

Passivhaus-Hallenbad Bambados Monitoring



Passivhaus Institut, August 2015

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen

Auftraggeber:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 0327431M

Autoren:

Dipl.-Ing. Esther Gollwitzer
Dipl.-Ing. (FH) Florian Gressier
Dipl.-Ing. (FH) Søren Peper

Unter Mitarbeit von:

MPhys. Jessica Grove-Smith
Tim Huyeng
Marissa Krieger
Richard Liebetrueth
Waldemar Rupps
Armin Bangert
Thomas Fester

Herausgeber:

Passivhaus Institut
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstraße 44/46
D-64283 Darmstadt
Tel: 06151-82699-0
E-Mail: mail@passiv.de
www.passiv.de

Darmstadt, August 2015

Dieser Bericht entstand im Auftrag der Stadtwerke Bamberg mit Fördermitteln des Projektträgers Jülich im Rahmen der EnOB-Forschung für energieoptimiertes Bauen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

Wir danken Thomas Murr, Elke Neuner, Christian Teufel, Robert Will, Klaus Wagner und Christoph Jeromin von den Stadtwerken Bamberg GmbH sowie Sven Steinmeier von der Fa. Aumasys GmbH für die gute Zusammenarbeit. Vielen Dank auch an Jörn Kaluza vom Ingenieurbüro inco GmbH und Thomas Albert vom Chemischen Labor Dr. Graser für die weiterführenden Messungen.

Adresse:

Hallenbad Bambados
Pöeldorfer Straße 174
96050 Bamberg
www.stadtwerke-bamberg.de/bambados

Alle Abbildungen und Grafiken dieses Berichtes sind Eigentum des Passivhaus Instituts. Abweichend sind jeweils die Quellen angegeben. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Pilotprojekt Passivhaus-Hallenbad Bambados	2
1.2	Was ist ein Passivhaus-Hallenbad?	4
2	Projektbeschreibung	6
3	Messtechnik	13
3.1	Temperatur- und Feuchtemessungen	13
3.2	Lüftungsgeräte	16
3.3	Verbrauchsmessung	16
4	Energiebilanz Berechnung	17
5	Auswertung Monitoring	19
5.1	Heizwärmeverbrauch	20
5.2	Stromverbrauch	30
5.3	Wasserverbrauch	39
5.4	Gebäudehülle	40
5.5	Wetterdaten/Außenbedingungen	51
5.6	Raumluftbedingungen Schwimmhallen	53
5.7	Lüftung Halle	74
5.8	Lüftung Nebenzonen	89
5.9	Warmwasserbereitung	100
5.10	Badewassertechnik	101
6	Ergebnisse und Zusammenfassung	107
6.1	Gesamtergebnisse	107
6.2	Zusammenfassung	109
6.3	Weiterer Forschungsbedarf	113
7	Anhang	114
8	Literaturverzeichnis	118

1 Einleitung

1.1 Pilotprojekt Passivhaus-Hallenbad Bambados

Im Juni 2007 beschloss der Stadtrat Bamberg den Neubau eines Hallenbades. Das alte denkmalgeschützte Hallenbad („Hallenbad am Margaretendamm“) war sanierungsbedürftig und eine Sanierung mit einer notwendigen Erweiterung der Schwimmflächen stellte sich nicht wirtschaftlich dar. Daher wurden der Neubau eines Hallenbades und die Schließung des alten Bades beschlossen. Die Standortwahl mit direkter Verbindung zum Stadionbad (Freibad) sollte zudem die Attraktivität des neuen Hallenbades steigern. Bei der Planung wurde besonders auf Familienfreundlichkeit, Sportlichkeit und Ökologie Wert gelegt.

Die Stadtwerke Bamberg sind als öffentlicher Träger für den Betrieb der Schwimmbäder in Bamberg zuständig. Die Gesamtplanung des Bades wurde durch ein Planungsbüro durchgeführt.

Um die Zukunft des Bades mit geringen Betriebskosten sicherzustellen und gleichzeitig das Ziel Ökologie konsequent zu verfolgen, entschied man sich mit dem Passivhauskonzept eine sehr gute Effizienz des gesamten Gebäudes anzustreben. Aus diesem Grund beauftragten die Stadtwerke Bamberg das Passivhaus Institut Darmstadt mit einer umfänglichen energetischen Beratung inkl. Energiebilanz und einem anschließenden Monitoring. Ziel war es, als Pilotprojekt ein Passivhaus-Hallenbad zu errichten und damit einen hochenergieeffizienten Betrieb des Bades zu ermöglichen. Zu diesem Zweck hat das Passivhaus Institut eine Energiebilanzberechnung (Mehrzonen PHPP) weiterentwickelt. Mit Hilfe dieser Energiebilanz konnte sowohl die Gebäudehülle als auch die technische Gebäudeausrüstung optimiert werden. Nach Fertigstellung des Bades wurde im Rahmen des Monitorings eine Betriebsoptimierung der Anlagentechnik und eine Auswertung der Verbrauchsdaten vom Passivhaus Institut durchgeführt.

Planungsbeginn war Mitte 2006, die Bauzeit begann im 2. Quartal 2009. Am 25. November 2011 wurde das Bambados offiziell eröffnet. Die Baukosten des gesamten Bades betrugen ca. 31,8 Millionen Euro netto [StadtwerkeBA 2015].

Nach der Realisierung des Bambados und des Lippe Bades in Lünen als Pilotprojekte kann für zukünftige Passivhaus-Hallenbäder auf vielfältige Erfahrungen zurückgegriffen werden, was geringere Kosten bzw. noch größere Energieeinsparungen zur Folge haben wird. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Bambados weiterzugeben, ist Ziel dieses Berichtes.



Abbildung 1: Luftbild Bambados während der Bauphase; Foto: Adolf Nüßlein
(Im Vordergrund rechts ist das angrenzende Stadionbad zu sehen)



Abbildung 2: Außenansichten Bambados: Nordost, West, Nordwest



Abbildung 3: Außenansichten Bambados: Ost, Südost

1.2 Was ist ein Passivhaus-Hallenbad?

Passivhaus steht für Energieeffizienz und ein nachhaltiges Gebäudekonzept.

Das heißt, eine gegebene Gebäudenutzung ist möglichst energieeffizient zu gestalten. Was ist dabei möglich oder sinnvoll? Das Mögliche ändert sich und entwickelt sich bei jedem Projekt weiter. Sinnvoll sind auf jeden Fall Maßnahmen, die über den Lebenszyklus betrachtet wirtschaftlich sind. Beim Passivhaus betrifft die Energieeffizienz nicht nur die Beheizung des Gebäudes, sondern sämtliche Energieverbräuche im Gebäude.

Für Wohngebäude und andere Nichtwohngebäude wie z.B. Schulen und Büros gibt es schon lange Kriterien/Grenzwerte für Passivhäuser (Kriterien auf www.passiv.de). Auch andere Nutzungen wie Archive, Museen, Labor, Feuerwachen usw. wurden als Passivhäuser realisiert.

Die Nutzung von Hallenbädern kann sehr unterschiedlich sein: Vom kleinen Schulschwimmbad mit 50 Nutzungsstunden pro Woche bis zu großen Freizeitbädern mit 110 Nutzungsstunden pro Woche und weiteren Angeboten wie Rutschen, Spa usw. Aus diesem Grund wäre es nicht zielführend, alle an demselben Gesamtgrenzwert zu messen. Das Vorgehen einer Optimierung basiert vielmehr darauf, einzelne Maßnahmen zur Effizienzsteigerung abzuwägen.

Das grundlegende Passivhauskonzept von Energieeffizienz und hoher Behaglichkeit kann, wie die Grundlagenuntersuchung [Schulz 2009] gezeigt hat, auf das Hallenbad übertragen werden. Wichtig ist die gewünschte Nutzung mit allen zugehörigen Energieverbräuchen zu analysieren und das

Konzept daraufhin abzustimmen. Es hat sich gezeigt, dass das Passivhaus mit einer sehr guten Gebäudehülle den Heizwärmeverbrauch signifikant reduziert und gleichzeitig noch weitere Maßnahmen zur Einsparung gegenüber Standardgebäuden ermöglicht. Durch höhere Innenoberflächentemperaturen steigt die Behaglichkeit für die Badegäste und gleichzeitig sind höhere Feuchten möglich, ohne dass Kondensat entsteht. Die Verdunstung sinkt und damit auch der Energiebedarf. Das bisherige Anblasen der Fassade in Hallenbädern ist bei thermisch optimierten Passivhaus-Fenstern nicht mehr notwendig. Dadurch kann der Luftvolumenstrom insgesamt gesenkt werden.

Eine energetisch hochwertige Gebäudehülle ist, wie sich herausstellt, der Grundstein eines effizienten Hallenbades - reicht allein aber nicht aus. Bedeutend ist die Optimierung des gesamten Hallenbadbetriebs (Beckenwassererwärmung, Wasseraufbereitung, Lüftung). Hier liegt das große zusätzliche Potenzial zur energetischen Optimierung. Bei der Planung von Passivhaus-Hallenbädern sollte daher auf folgende Aspekte geachtet werden [Gollwitzer 2011]:

- Sehr gut wärmegedämmte und luftdichte Gebäudehülle
- Hohe minimale Oberflächentemperaturen (Fensterrahmen, Glasrand)
- Zonierung nach Temperaturbereichen + interne thermische Trennung der Zonen
- geeignete Luftdurchströmung der Halle
- bedarfsgerechte Lüftung (Umluftanteil reduzieren, Regelsensoren in den Nebenzonen)
- Druckverlust optimierte Lüftungskanalnetze und Badewasserkreisläufe
- Verdunstung reduzieren (interne Umwälzung nachts, Feuchte soweit möglich erhöhen)
- geeignete Auslegung der Pumpen für die gegebenen Betriebspunkte
- energieeffiziente Stromnutzung in allen Bereichen des Gebäudes

Nach erfolgter Planung bietet aber auch der Bau und der Betrieb die Möglichkeit den Energieverbrauch zu senken. Bei der Realisierung von Passivhaus-Hallenbädern sind folgende Aspekte wichtig:

- Qualitätssicherung bei der Ausführung der Gebäudehülle
- Luftdichtheitstest
- Gebäudetechnik: Betrieb möglichst nach dem konkreten Bedarf (ggf. abweichend von Auslegungswerten nach Normen)
- Qualitätssicherung für die Umsetzung der Regelungstechnik
- Optimierung der Regelung im Betrieb

Weitere Informationen zu Passivhaus-Hallenbädern stehen kostenlos auf www.passiv.de und www.passipedia.de zur Verfügung: Grundlagenuntersuchung über Passivhaus-Hallenbäder [Schulz 2009] und Berichte über das Lippe Bad in Lünen: [BGL 2011], [Peper / Grove-Smith 2013]

2 Projektbeschreibung

Tabelle 1: Wichtige Kennzahlen des Bambados

Bambados in Zahlen	
Personenzahl (projektiert)	1.100 Pers./d
Brutto-Grundfläche (BGF) ca.	13.500 m ²
Energiebezugsfläche (EBF)	10.743 m ²
Brutto-Rauminhalt (BRI)	93.500 m ³
Beckenfläche innen	1.742 m ²
Beckenfläche außen	61 m ²
Hüllfläche des Gebäudes	19.420 m ²
A/V - Verhältnis	0,21
Durchschnittlicher U-Wert der Gebäudehülle (inkl. Fenster, Wärmebrücken und Abminderungsfaktor gegen Erdreich)	0,164 W/(m ² K)
n50-Wert	0,07 h ⁻¹
q50-Wert	0,21 m/h

Nutzung

Das Bambados bietet folgende Nutzungen:

- Sportbereich: Sportbecken (8 Bahnen à 50m), unterteilbar und teilweise mit Hubboden
- Lehrbereich: 2 Lehrschwimmbecken in abgetrennten Räumen, eines davon mit Hubboden
- Freizeitbereich: Freizeitbecken mit Grotte und Sprudelliegen, Eltern-Kind-Becken
- Rutschenbereich: 2 Rutschen
- Dachterrasse: mit Außenbecken
- Saunabereich: 5 Saunakabinen, 1 Dampfbad, 2 Infrarotkabinen
- Vermieteter Bereich: wird als Spabereich verwendet
- Saunagarten: mehrere Saunakabinen, Ruheraum und unbeheizter Badeteich
- Gastronomie: für den Freizeitbereich und Saunabereich
- Umkleide + Duschen: getrennt für Sportbecken, Freizeitbecken und Sauna
- Verwaltungsbereich: Büros
- Technikbereich: Gebäudetechnik + Schwimmbadtechnik
- Blockheizkraftwerk: als separates Gebäude

Als Pilotprojekt eines Passivhaus Hallenbades konzentrierte man sich zunächst auf die Beratung des Hauptgebäudes, d.h. außenliegende Saunen, Becken und BHKW-Gebäude sind nicht Teil des Passivhauses.

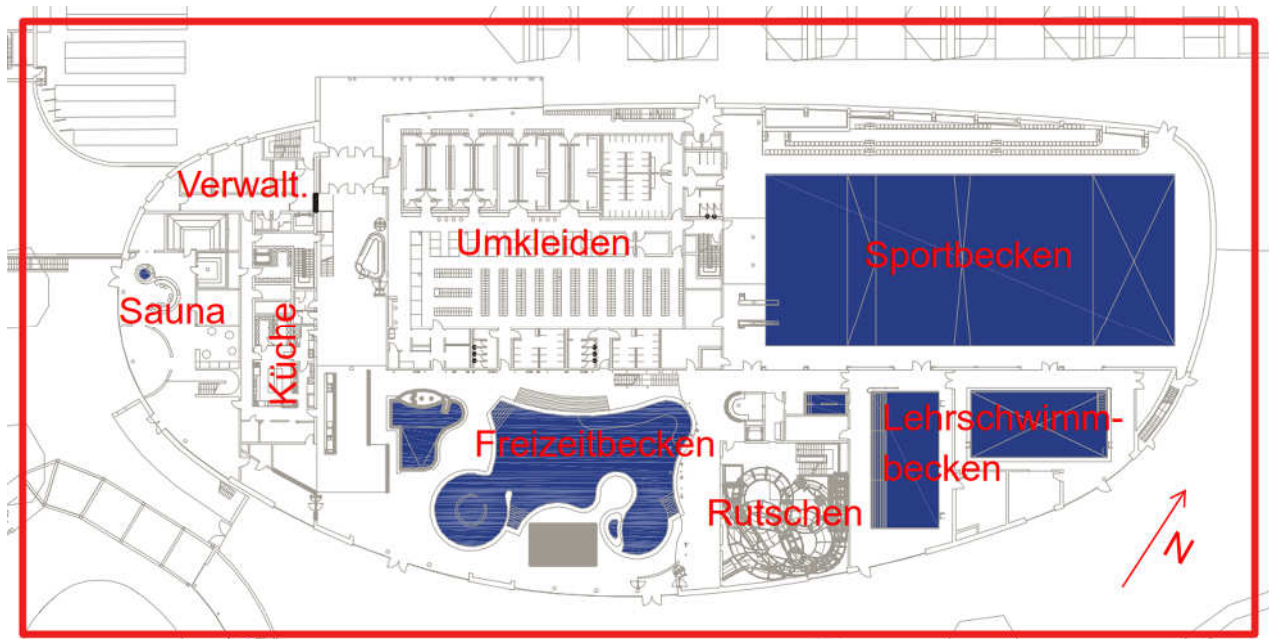


Abbildung 4: Nutzungsbereiche im Erdgeschoss



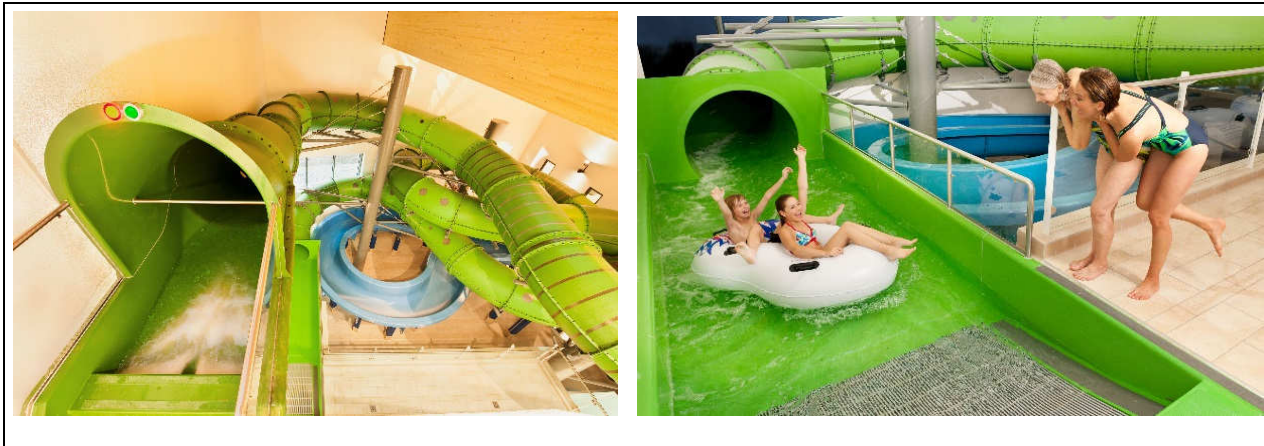


Abbildung 5: Innenaufnahmen: Foyer, Eltern-Kind-Becken, Sauna, Rutschen (Fotos: Stadtwerke Bamberg)

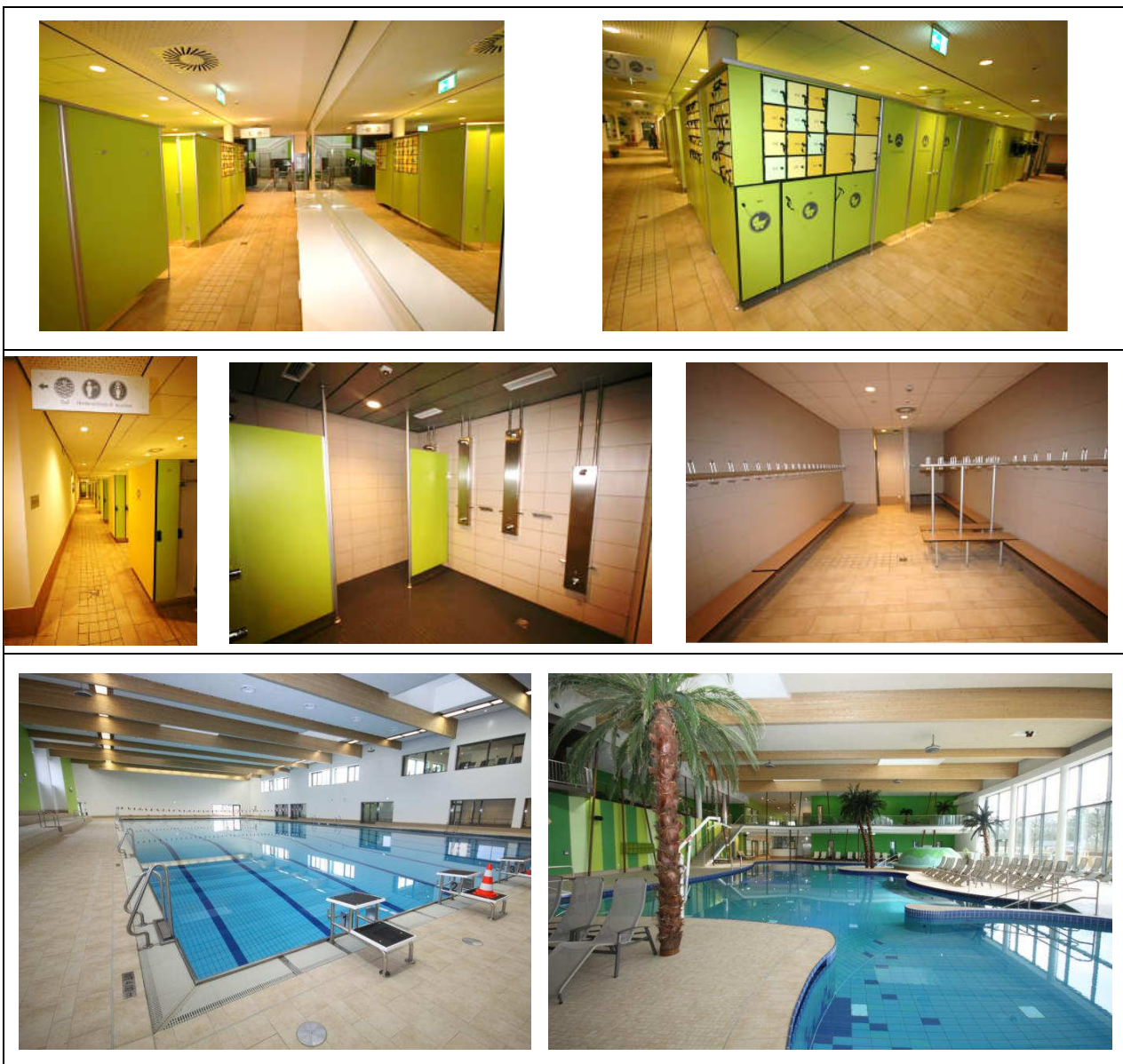


Abbildung 6: Innenaufnahmen: Umkleiden, Duschen, Sammelumkleide, Sportbecken, Freizeitbecken

Gebäudeentwurf

Das Bambados ist ein kompaktes Gebäude, das nach Norden einen geringen Verglasungsanteil hat und sich nach Süden zum Freigelände hin mit großzügigen Verglasungen öffnet. Im Norden befinden sich die Halle mit Sportbecken, die Umkleiden, die Verwaltung und der separate Spabereich. Nach Südosten gerichtet ist der Freizeit- und Lehrschwimmbeckenbereich. Die Saunazone orientiert sich nach Südwesten. Das Gebäude hat aufgrund der Größe und der optimierten ovalen Gebäudeform ein sehr günstiges A/V-Verhältnis (Oberfläche zu Volumen). Die Beckenbereiche werden durch aufgesetzte Sheddachhauben belichtet.

Gründung

Der größte Teil des Gebäudes ist unterkellert (Technikgeschoss). Die Gründung erfolgte mit Bohrpfählen. Die Bodenplatten im Keller und im nicht unterkellerten Bereich sind gedämmt. Die Bohrpfähle am Rand des Gebäudes haben eine Begleitdämmung. Die große Grundfläche des Gebäudes würde sich für eine Dämmschürzenlösung eignen. Dieser Vorteil konnte leider nicht genutzt werden, da sich aufgrund hohen Grundwassers der notwendige „Wärmesee“ im Erdreich unterhalb des Gebäudes nicht einstellen kann.

Gebäudehülle

Die thermische Gebäudehülle hat eine umlaufende Dämmschicht. In der nachfolgenden Tabelle sind die regulären Bauteilaufbauten zusammengefasst.

Tabelle 2: Bauteilaufbauten im Bambados

	Gesamtbauteil		Dämmschicht		
	Dicke [m]	U-Wert [W/(m²K)]	Material	Dicke [mm]	λ [W/(mK)]
Außenwand	0,55	0,135	Mineralwolle	300	0,035
Außenwand gegen Erdreich	0,55	0,137	XPS	300	0,042
Bodenplatte	0,75	0,142	XPS	300	0,045
Dach (Holz)	0,38	0,097	EPS/XPS+ Mineralwolle	280+80	0,035/0,040
Dach (Beton)	0,61	0,095	EPS/XPS	360	0,035



Abbildung 7: Wanddämmung, filigrane Fassadenanker und Attikakonstruktion aus Holz

Zwei häufig realisierte Schwachstellen in der Gebäudehülle von Hallenbädern konnten im Entwurf komplett umgangen werden: Es gibt einen Ausschwimmtunnel zum Außenbecken, der in einer windgeschützten Außenzone startet und damit nicht die thermische Hülle durchdringt. Durch Integration der Rutsche (vom 1. OG bis zum UG) in das Gebäudevolumen wurden signifikante Transmissionsverluste vermieden.

Luftdichtheit

Aus bauphysikalischen Gründen ist die Luftdichtheit in Hallenbädern besonders wichtig. Die luftdichte Ebene wird weitgehend durch den Baustoff Beton gebildet. Darüber hinaus musste auf die Anschlüsse der Fenster und des Holzdachs und die Stöße von Betonfertigteilen geachtet werden. Die Luftdichtheitsmessung ergab einen n_{50} -Wert von $0,07 \text{ h}^{-1}$ bzw. einen q_{50} -Wert von $0,21 \text{ m/h}$.

Fenster

Für die Pfosten-Riegel-Fassaden und die Fensterrahmen wurden vom Bauherrn Aluminiumprofile ausgesucht. Aluminiumfenster haben gegenüber vergleichbaren Holz- oder PVC-Fenstern den Vorteil hoher Oberflächentemperaturen auch am Glasrand. Nur im Untergeschoss kamen PVC-Rahmen zum Einsatz. Die Verglasungen sind mit einer Dreifach-Wärmeschutzverglasung realisiert (durchschnittlich: $U_g = 0,54 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, g -Wert = $0,49$).

Sonnenschutz

Ein beweglicher außenliegender Sonnenschutz wurde für die nach Südwesten gerichtete Saunazone und den nach Süden gerichteten Freizeitbereich installiert. Im Saunabereich ist die Verschattung für dieses spezielle Projekt (interne Wärmegewinne, große Verglasung) sinnvoll. Die Verschattung im Freizeitbereich ist für die Raumtemperaturen wahrscheinlich nicht notwendig, sondern kann sogar bei ungünstiger Steuerung den Heizwärmebedarf leicht erhöhen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass es

technische Geräte (Zugangskontrolle) gibt, die vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden müssen, also nicht direkt vor eine Glasfassade positioniert werden sollten.

Heizen

Das Schwimmbad wurde zusammen mit einem nebenstehenden Versorgungsgebäude mit Holzvergasung (BHKW) geplant und gebaut. Diese lokale und mit nachwachsenden Rohstoffen erzeugte Energie ist ein weiterer Gesichtspunkt der zu dem ökologischen Gesamtkonzept des Bambados beiträgt. Neben dem BHKW (230 kW thermische, 150 kW elektrische Leistung), gibt es noch drei Spitzenlastkessel (Gas) mit Brennwertechnik von je 450 kW Heizleistung. Wie sich schon früh im Betrieb gezeigt hat, ist der Energieverbrauch des Gebäudes so niedrig, dass keine durchgehende Leistungsabnahme für das BHKW besteht.

Die Wärme wird über eine Nahwärmeleitung von der Heizzentrale zum Hallenbad geführt. Innerhalb des Gebäudes gibt es eine gemeinsame Ringleitung, die die einzelnen Heizkreise für Trinkwarmwasser-, Beckenwassererwärmung und Raumheizung versorgt. Weitere Wärme wird über Fortluftwärmepumpen der Lüftungsgeräte erzeugt. Zudem wird die Abwärme der Kühlung für die kalten Becken und der Kühlräume mit Hilfe eines Pufferspeichers zur Erwärmung des Beckenwassers verwendet.

Die Beheizung des Gebäudes erfolgt überwiegend über Zuluft. Einzelne Warmebänke im Sport- und Saunabereich werden zeitweise beheizt.

Sauna

Da die übliche direktelektrische Beheizung von Saunakabinen zu einem hohen Primärenergiebedarf führt, werden die Saunen mit Gas beheizt. Es gibt bereits auf dem Markt verfügbare Gasöfen. Diese arbeiten nach dem Dunkelstrahlerprinzip und benötigen einen separaten Raum direkt neben der Saunakabine und eine Abgasführung über Dach. Diese Umplanungsmaßnahmen zu einem späten Stadium gelangen, indem benachbarte Saunakabinen gemeinsam von einem Technikraum versorgt werden. Zu erwähnen ist, dass diese Brenner von der Saunakabine aus zu hören sind, was aber zu keinen Beschwerden seitens der Gäste führte. Die Infrarotkabinen und das Dampfbad werden elektrisch beheizt.

Lüftung Schwimmhallen

Die Lüftung ist der elementare Bestandteil der Anlagentechnik, der die Luftqualität und die Entfeuchtung sicherstellt. Im Bambados werden der Sportbereich inkl. Rutschen, sowie der Freizeitbereich jeweils mit zwei Lüftungsgeräten, sogenannte Doppelachsen, versorgt. Die Geräte stehen in einem Technikraum im 2. OG. Von dort führen gedämmte Außen- und Fortluftkanäle (Dämmstärke 76 mm) direkt auf das Dach. Beide Räume der Lehrschwimmbecken werden von einem Lüftungsgerät, das im Untergeschoss steht, versorgt. Bei den Lüftungsgeräten handelt es sich um spezielle Geräte für Hallenbäder mit mehrstufiger Wärmerückgewinnung vom Typ ThermoCond R 37 der Firma Menerga.

Lüftung Nebenzonen

Neben den fünf Lüftungsgeräten für die Schwimmhallen, gibt es sechs Lüftungsgeräte für die Nebenzonen, die alle im Untergeschoss stehen:

- Umkleiden / Duschen EG
- Foyer / Verwaltung
- Lager / Technik
- Küche / Nebenräume
- Sauna EG/OG
- Umkleiden Sauna OG

In diesen Bereichen wurde größtenteils eine gerichtete Überströmung realisiert, um die Volumenströme zu senken. Die Außen- und Fortluftkanäle für alle Geräte im Untergeschoss münden in Sammelkanälen, die durch das Erdreich zu einem Lüftungsturm führen, der in den Saunagarten integriert ist. Der Sammelkanal ist im Gebäudeinneren mit 100 mm Isolierpanelen gedämmt.

Badewassertechnik

Zentrale Aufgabe eines Hallenbades ist es, sauberes und warmes Wasser zum Schwimmen bereitzustellen. Die Betreiber haben sich schon früh in der Planungsphase für die relativ junge Technik der Ultrafiltration entschieden. Der Kreislauf der Beckenwasserumwälzung beinhaltet folgende Stationen:

- Überlaufrinne
- Schwallwasserbehälter
- Flockung
- Vorfilter
- Aktivkohle
- Ultrafiltration
- Erwärmung durch Wärmepumpe des Lüftungsgerätes
- Erwärmung durch regulären Heizkreis
- pH-Wert Korrektur
- UV-Bestrahlung
- Chlorung (Chlorgasflaschen im benachbarten Freibadgebäude)
- Marmorkies (pH-Wert Korrektur)
- Horizontale Einströmung ins Becken

Nachts, während das Bad geschlossen ist, wird eine interne Umwälzung gefahren, indem das Wasser direkt aus dem Becken entnommen und nicht über die Überlaufrinnen geführt wird. Beide Betriebsweisen sind in Abbildung 90 dargestellt.

Im Bambados gibt es neben den reinen Schwimmbecken auch Attraktionen wie Rutschen, Massagedüsen, Sprudelliegen und einen Strömungskanal. Für diese Attraktionen wurden weitere Pumpen bzw. ein Seitenkanalverdichter eingebaut.

Beleuchtung

Die Ausgestaltung der Fassade ist der Nutzung solarer Gewinne angepasst und kann bei Bedarf verschattet werden. Richtung Nordwesten bis Nordosten ist die Fassade größtenteils geschlossen. Die Südfassade bietet mit vorwiegend raumhohen Verglasungen eine gute Tageslichtnutzung im Sauna- und Freizeitbereich. Der Sportbereich, der Freizeitbereich und das Foyer werden über im Dach befindliche shedartige Dachaufbauten mit Tageslicht versorgt. In vielen Bereichen wird die elektrische Beleuchtungsstärke bei hohen Außenhelligkeiten über eine Tageslichtsteuerung entsprechend heruntergeregelt. Dazu befinden sich auf dem Dach drei Helligkeitssensoren (Orientierungen Ost, Süd und West).

Im Gebäude wurden weitgehend T5-Leuchtstoffröhren bzw. LED Lampen eingesetzt. Damit konnte eine gute Energieeffizienz mit einem berechneten Mittelwert (nach Fläche und Beleuchtungsstärke gewichtet) von 2,37 W/(m²*100lx) erreicht werden.

3 Messtechnik

Zur Erfassung und Steuerung der technischen Betriebsbedingungen ist im Bambados eine Gebäudeleittechnik (GLT) installiert. Eingerichtet und unterhalten wurde diese durch die Firma Aumasys GmbH. Für das wissenschaftliche Monitoring sind zahlreiche zusätzliche Zähler und Sensoren, etwa zur detaillierteren Verbrauchs- sowie genaueren Temperatur- und Feuchteerfassung montiert worden. Zusätzlich wurde vom PHI ein eigenes M-Bus-System aufgesetzt, um Sensoren in allen elf Lüftungsgeräten zur detaillierten energetischen Beurteilung auszulesen. Die wichtigsten Messgruppen werden im Folgenden beschrieben.

3.1 Temperatur- und Feuchtemessungen

3.1.1 Raumluf

Die kontinuierliche Lufttemperatur- und Luftfeuchtemessung in den Schwimmhallen sowie den übrigen Räumen des Bambados erfolgt an nahezu allen Stellen mittels Temperatur-Feuchte-Kombi-Sensoren vom Typ Hygrasgard RFTF des Herstellers S+S Regeltechnik GmbH mit Messungenauigkeiten von $\pm 0,1$ K und ± 3 % rF im relevanten Bereich.

3.1.2 Kalibrierung

Da die Temperatur- und Feuchtemesswerte dem wissenschaftlichen Monitoring dienen sollen, wurden an allen zugänglichen Messstellen am 11. & 12.06.2012 Kalibriermessungen durchgeführt. Dafür wurden zuvor in der Klimakammer des PHIs kalibrierte Datenlogger des Typs HOBO Pro v2 der Fa. Onset verwendet. Diese wurden zur Messung (Messintervall: 5 Minuten) mindestens eine Stunde lang an den jeweiligen Sensorgehäusen befestigt, um möglichst genau denselben Bedingungen ausgesetzt zu sein. Damit konnten 27 Messkanäle überprüft und kalibriert werden. Anschließend wurden die Messdaten verglichen und Offsetwerte ermittelt. Die verwendeten Messdaten der GLT wurden mit den entsprechenden Offsetwerten verrechnet.



Abbildung 8: links: Wandsensor für Temperatur und relative Feuchte, rechts: Wandsensor mit Datenlogger zur Kalibrierung (temporär)

3.1.3 Fenster-Oberflächentemperaturen

Die Messung der Fenster-Oberflächentemperaturen erfolgt an sechs Stellen jeweils am Glasrand mittels Oberflächensensoren mit Aluminiumgehäuse der Fa. S+S. Vier der sechs Sensoren konnten kalibriert werden, die anderen beiden sind nicht zugänglich.

3.1.4 Außenluft und Globalstrahlung

Die Außenluftbedingungen und Globalstrahlung werden mit Hilfe einer Wetterstation etwa in der Mitte des Dachs ca. 2,5 m über dem Dachniveau erfasst. Zur Lufttemperatur- und Luftfeuchtemessung dient ein witterungs- und strahlungsgeschützter „Hygro-Thermogeber compact“ des Herstellers Adolf Thies. Die Globalstrahlung wird mit Hilfe eines Pyranometers vom Typ CM 11 des Herstellers Kipp & Zonen B.V. gemessen.



Abbildung 9: Wetterstation auf dem Dach des Bambados

3.1.5 Beckenwassertemperaturen

Die Erfassung der Wassertemperaturen der verschiedenen Becken erfolgt jeweils mittels der kontinuierlich durchflossenen chemischen Messzelle Depolox Pool des Herstellers Wallace & Tiernan GmbH. Direkt in den einzelnen Becken durchgeführte Vergleichsmessungen haben eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten der Messzellen gezeigt.



Abbildung 10: Chemische Messzelle zur Überwachung des Beckenwassers

3.1.6 Kaltwassertemperaturen

Da für die Kaltwassertemperatur (Trinkwasser) an keiner Stelle eine dauerhafte Messstelle vorgesehen war, wurde für die Messzeit des Monitorings ein Temperatur-Datenlogger mit einem Anlegefühler gedämmt am Rohr der Hauptzapfstelle für Trinkwasser angebracht.



Abbildung 11: Temperatur-Datenlogger zur Aufzeichnung der Kaltwasser-Temperatur (links), (Rechts befindet sich die Hauptwasseruhr)

3.2 Lüftungsgeräte

Zur Erfassung der Zustände in den Lüftungsgeräten sind herstellerseitig Temperatur- und Feuchtesensoren sowie Differenzdrucksensoren zur Erfassung des Volumenstromes verbaut. Außerdem werden Stellungen von Lüftungsklappen und Ventilen von Heizregister und ggf. Wärmepumpe erfasst. Die Luftbedingungen innerhalb der verschiedenen Kammern (Zu-, Ab-, Außen- und Fortluft; Zuluft ggfls. vor und hinter Wärmepumpe) der Lüftungsgeräte werden zusätzlich mittels abgeschirmter Temperatur- und Feuchtesensoren vom Typ EE21 des Herstellers E+E Elektronik GmbH über das gesonderte M-Bus-Netz gemessen, da herstellerseitig nicht alle für das Monitoring notwendigen Größen erfasst werden. Herstellerseitig sind zur Lufttemperatur- und Luftfeuchtemessung in der Abluft Sensoren vom Typ Sensirion SHT 75 verbaut.

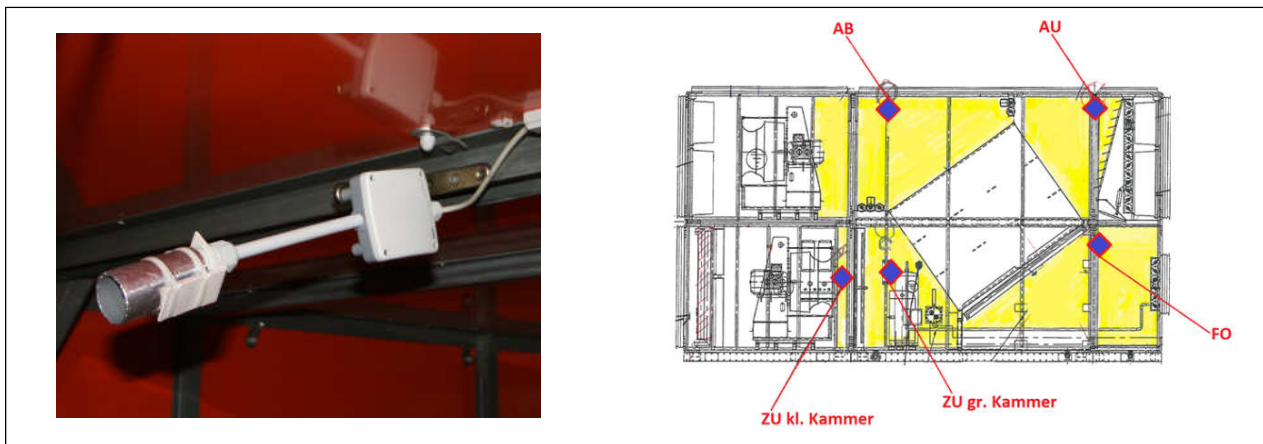


Abbildung 12: links: Sensor für Temperatur und relative Feuchte mit Strahlungs-Abschirmung in einem Lüftungsgerät, rechts: Positionen der Sensoren im Schnitt eines Lüftungsgerätes

3.3 Verbrauchsmessung

3.3.1 Stromverbrauch

Der elektrische Stromverbrauch wird mittels handelsüblicher Stromzähler mit digitaler Schnittstelle erfasst und gliedert sich in die Bereiche

- Strom Badewassertechnik
- Strom Lüftung
- Strom Beleuchtung
- Strom Divers (für sonstige Technik und restliche Verbraucher
inkl. Küche, Sauna, Verwaltung, Kassen etc.)
- Strom Außenanwendungen (Gehwegheizung, Lüftungsgerät Außensauna, Außenbecken mit Badewassertechnik, Parkplatzbeleuchtung & weitere Außenbeleuchtung)

3.3.2 Wärmeverbrauch

Die vom Holzgas-BHKW erzeugte Wärme, die bei höheren Wärmeabnahmen durch Erdgas-Spitzen-Kessel ergänzt wird, wird für alle Verbraucher einzeln mittels handelsüblicher Wärmemengenzähler mit digitaler Schnittstelle erfasst. Der Wärmeverbrauch lässt sich auf folgende Bereiche aufgliedern:

- Wärme Beckenwassererwärmung
- Wärme Warmwasserbereitung
- Wärme Lufterhitzung (RLT)
- Wärme außen

3.3.3 Gasverbrauch

Mit Gas werden sowohl die drei Saunakabinen im inneren des Bambados als auch zwei Saunakabinen im Saunagarten beheizt. Aufgrund des geringen Gasdrucks konnte nur ein Hauptzähler eingebaut werden. Über die Größe der Kabinen, die Innentemperatur, die Dämmqualität und die Temperaturdifferenz zur Umgebung wurde folgende Aufteilung des Gasverbrauchs abgeschätzt: 70 % der Energie wird für die Außensaunen und 30 % der Energie wird für die Innensaunen aufgewandt.

4 Energiebilanz Berechnung

Gesetztes Ziel war es, die Energieeffizienz des Gebäudes zu steigern. Gerade im Hallenbad beeinflussen sich verschiedene Energieströme gegenseitig. Deshalb ist eine Energiebilanz unersetzbar für den Optimierungsprozess während der Planungsphase.

Das bewährte PHPP (Passivhausprojektierungspaket) musste für das Hallenbad entscheidend erweitert werden. Während das PHPP ein 1-Zonenmodell ist, wurden für das Bambados mehrere PHPPs miteinander gekoppelt (Mehrzonen-PHPP). Dies ermöglicht es, die verschiedenen Temperaturzonen im Gebäude abzubilden und durch Iterationen die Querwärmeströme und damit die Gesamtenergiebilanz zu berechnen. Einzelne Aspekte wurden mittels dynamischer Gebäudesimulation (Sommerlüftung und Verschattung) genauer betrachtet.

Im Laufe der Planungsphase wurde die Energiebilanz mitgeführt, verfeinert und war dabei ein wichtiges Instrument zur Optimierung des Gebäudes. Es konnten verschiedene Optionen und deren Auswirkungen untersucht werden. Basierend auf diesen Entscheidungshilfen konnte der Gesamtenergiebedarf Schritt für Schritt gesenkt werden.

Während der Bauphase wurde kurzfristig eine Änderung der Lüftungszonierung vorgenommen. Anstatt weiterhin die Energiebilanz nachzuführen, wurde die verfügbare Zeit genutzt, verstärkt die Regelung der Gebäudetechnik - insbesondere der Lüftungstechnik - voranzutreiben. Die Optimierung geschah dann mit Hilfe des Zugriffs auf die Messdaten über die Gebäudeleittechnik.

In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Zonen des PHPPs mit den zugehörigen Temperaturen abgebildet.

Tabelle 3: Die verschiedenen Zonen des PHPPs mit zugehörigen Energiebezugsflächen und Temperaturen

Zone	Bezeichnung	EBF [m²]	projektierte Solltemperatur [°C]	max. Temperatur [°C]
1	Verwaltung und Foyer	1.012	22	25
2	Saunabereich	771	26	30
3	Dusche und Umkleiden	1.410	26	30
4	Schwimmhalle	2.886	32	34
5	Keller	2.993	15	30
6	Becken (Wasser)	1.671	28,5	30

5 Auswertung Monitoring

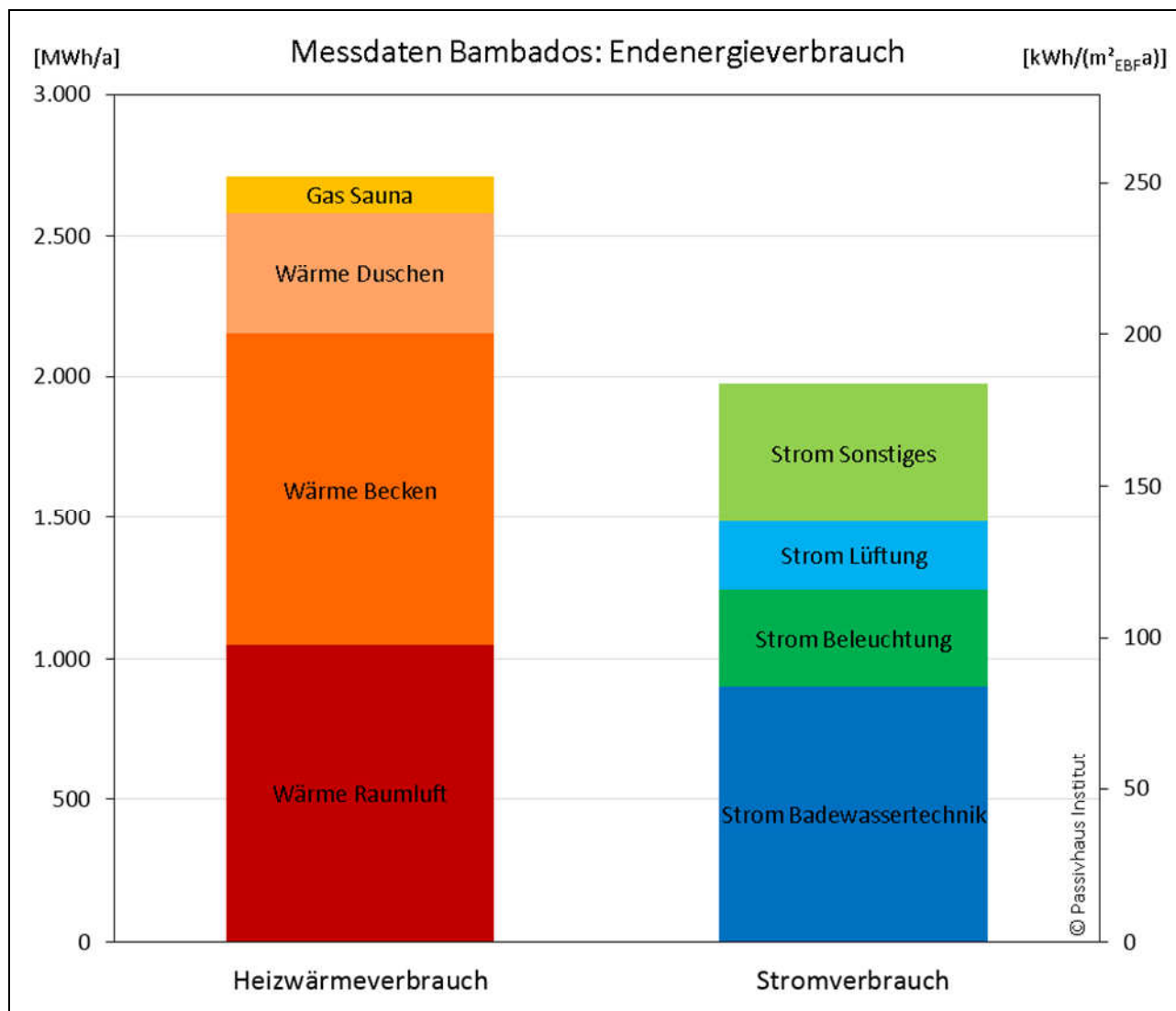


Abbildung 13: Zusammensetzung des Jahresendenergieverbrauchs (Mai 2014 bis April 2015) für das gesamte Hallenbad (ohne Außenbereiche) (EBF = Energiebezugsfläche des Gebäudes)

Ziel des Monitorings war, die Konzepte und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung in der Praxis zu überprüfen. Zusätzlich diente das Monitoring zur Überprüfung der Betriebsweisen und der Betriebsoptimierung. In Abbildung 13 ist die Zusammensetzung des Endenergieverbrauchs dargestellt. Der Heizwärmeverbrauch ist mit 252 kWh/(m²_{EBFa}) höher als der Stromverbrauch mit 184 kWh/(m²_{EBFa}). Im Bereich Heizwärme dominiert der Verbrauch zur Beheizung der Luft und der Becken. Der größte Anteil des Stromverbrauchs wird durch die Badewassertechnik gebildet. Weitere Potentiale hierzu werden in Kapitel 5.10 aufgezeigt. Im Kapitel „5 Auswertung Monitoring“ werden zuerst die Gesamtverbräuche (Wärme, Strom, Wasser) und die Energieerzeugung dargestellt und anschließend die verschiedenen Bereiche des Hallenbades detaillierter untersucht. Am Ende des Berichts im Kapitel „6.1 Gesamtergebnisse“ werden die Verbrauchsdaten des Bambados den Daten anderer Bäder gegenübergestellt.

5.1 Heizwärmeverbrauch

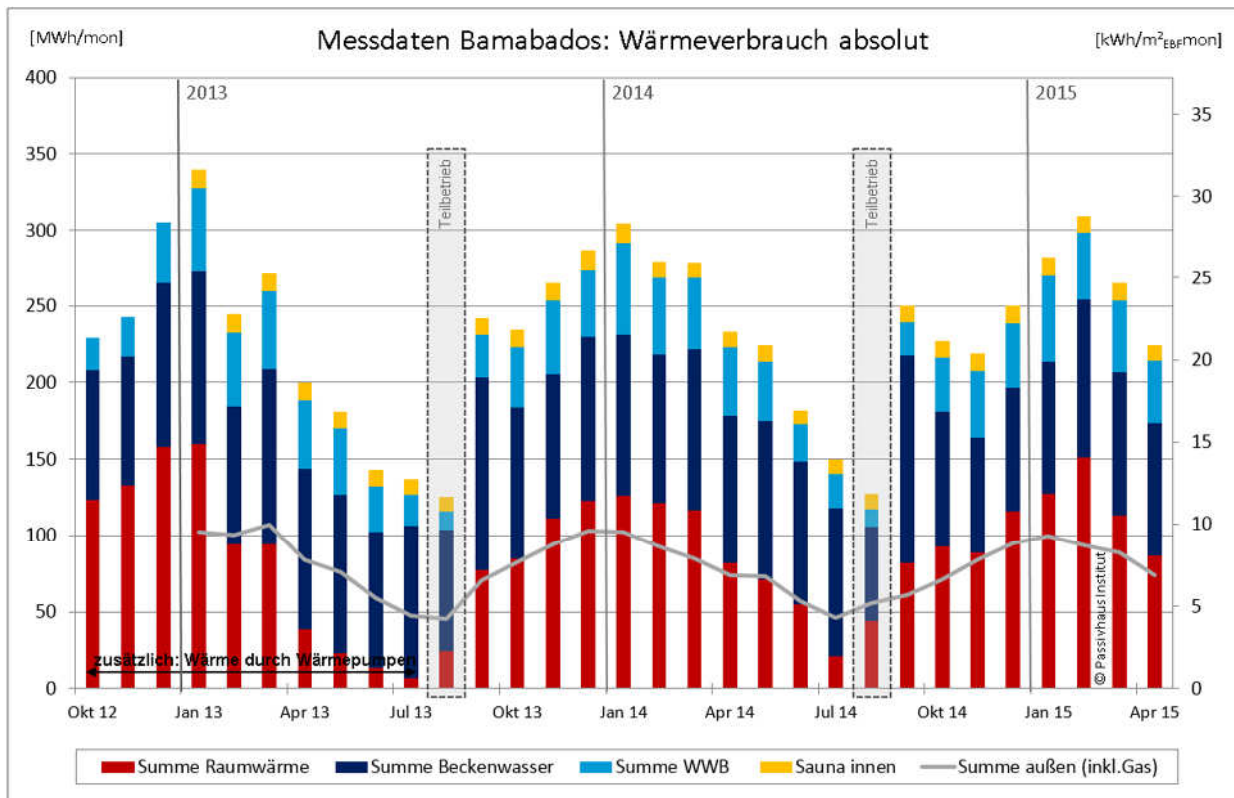


Abbildung 14: Monatlicher Heizwärmeverbrauch für das komplette Bad (WWB = Warmwasserbereitung Duschen) Nicht dargestellt ist die Heizung der Saunakabinen.

Als Pilotprojekt bezog sich die Beratung durch das Passivhaus Institut beim Bambados auf die Energieeffizienz im Hauptgebäude. Trotzdem wurden die Verbräuche außerhalb (z.B. Saunagarten, Außenbecken) messtechnisch erfasst und werden in Abbildung 14 ergänzend dargestellt. Deutlich sind die jahreszeitlichen Schwankungen des Energieverbrauchs zu sehen.

5.1.1 Heizwärmeverbrauch für Räume

Die Räume werden fast ausschließlich über Nacherhitzung der Zuluft geheizt. Der Heizwärmeverbrauch für die einzelnen Zonen ist sehr unterschiedlich. Dies beruht auf den unterschiedlichen Nutzungen und Solltemperaturen. Der höchste Verbrauch liegt wie zu erwarten im Hallenbereich mit Raumtemperaturen von 30 bis 32 °C (siehe Abbildung 15, oberes Diagramm).

Geringere Heizwärmeverbräuche benötigen die Zone Dusche/Umkleide und die Küche (siehe Abbildung 15, mittleres Diagramm). Die Raumtemperaturen der Umkleiden/Duschen liegen mit 28 bis 30 °C deutlich höher als in den meisten anderen Gebäudenutzungen. Die Zone wird allerdings von den angrenzenden Schwimmhallen mitgeheizt. Auffallend ist, dass der Heizwärmeverbrauch für die Umkleiden/Duschen im Erdgeschoss wesentlich höher als der Verbrauch für die

Umkleiden/Duschen im Obergeschoss ist. Hintergrund ist der Raumverbund zum Foyer mit Eingangstüren im Erdgeschoss. Um diese Querwärmeströme zu verringern und die Temperaturen sowohl im Umkleide- als auch im Foyerbereich einzeln steuern zu können, wäre hier eine Trennung der Räume zu empfehlen.

Warme Zuluft wird in die Umkleiden eingebracht, strömt in die Duschen über und wird dort als Abluft abgeführt. Dieses Konzept hat sich in der Praxis bewährt und zeigt, dass eine aktive Überströmung zu den Duschen mit Nacherhitzung nicht notwendig ist. Damit konnten sowohl Investitionskosten, Raumbedarf und Betriebskosten gespart werden.

Der Heizwärmeverbrauch der Küchenzone beruht auf dem hohen Luftwechsel ohne Wärmerückgewinnung durch die Ablufthauben. Weiteres Potential würde hier im Betrieb von Induktionshauben mit kalter Zuluft bestehen.

Alle weiteren Nebenzonen (Lager/Technik, Verwaltung/Foyer, Sauna) haben untergeordnete Heizwärmeverbräuche (siehe Abbildung 15, unterstes Diagramm). In der Zone Sauna kommen hier verschiedene Gründe zusammen: Erhöhte interne Wärmegewinne durch Saunakabinen, gemeinsame Lüftungsanlage für Saunakabinen und Saunavorraum (abweichende Empfehlung siehe 5.8 Lüftung Nebenzonen) und hohe solare Gewinne durch große westorientierte Verglasung.

Der unterschiedliche Bedarf der Zonen ergibt sich nicht nur durch die unterschiedlichen Solltemperaturen, sondern auch durch unterschiedliche interne Wärmegewinne und an die Lage der Zone im Gebäude. Während sich die Temperaturstaffelung Umkleiden - Duschen - Schwimmhalle als günstig erweist, wäre eine bessere thermische Trennung z.B. zwischen Saunazone und Verwaltungsbereich zu empfehlen. Dies hat den Vorteil, dass die Raumtemperaturen besser geregelt werden können. Werden dadurch unnötige Querwärmeströme verringert, kann dies außerdem zu einer weiteren Senkung des Gesamtheizwärmeverbrauchs führen.

In Abbildung 15 (oberes Diagramm) lassen sich zwei Änderungen der Betriebsweise sehr gut erkennen:

- Februar 2015, Lüftungsgerät Freizeit: Die Solltemperatur der Freizeit-Halle wurde auf Wunsch der Gäste von 32 °C auf 34 °C erhöht. Infolgedessen steigt der Heizwärmebedarf auf mehr als das Doppelte.
- Februar 2015, Lüftungsgerät Sport: Aufgrund eines Fehlers bei der Wartung läuft das Lüftungsgerät 13 Tage lang mit erhöhtem Volumenstrom (ca. 22.000 m³/h statt ca. 10.000 m³/h). Dadurch erhöhen sich die Lüftungswärmeverluste und der Wärmeverbrauch liegt in dieser Zeit signifikant höher.

Dem hohen Energieverbrauch des Sportbereichs im Juni, August und September 2014 muss ein technischer Defekt zu Grunde liegen, da trotz Anzeige des Ventils als geschlossen geheizt wurde. Dies wird deutlich durch die Ablufttemperatur bestätigt.

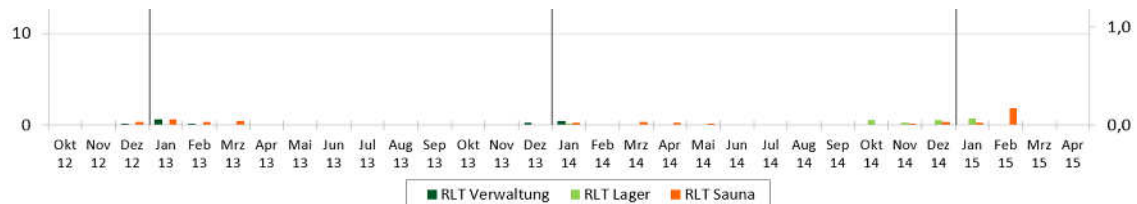
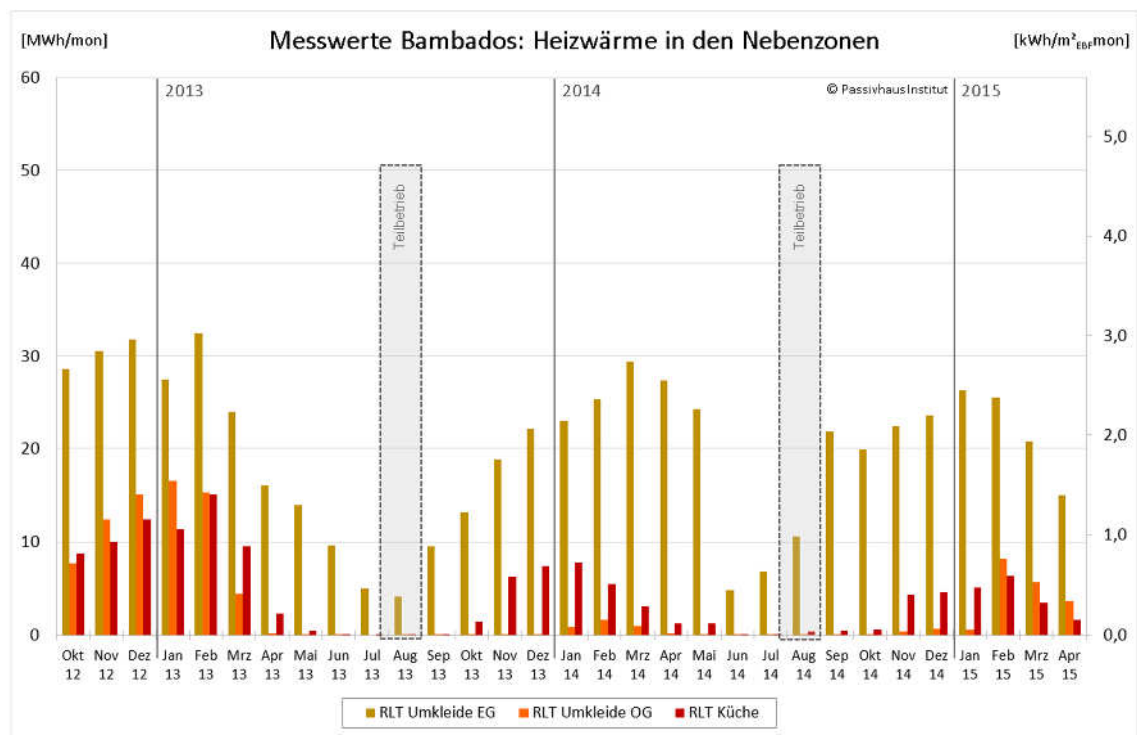
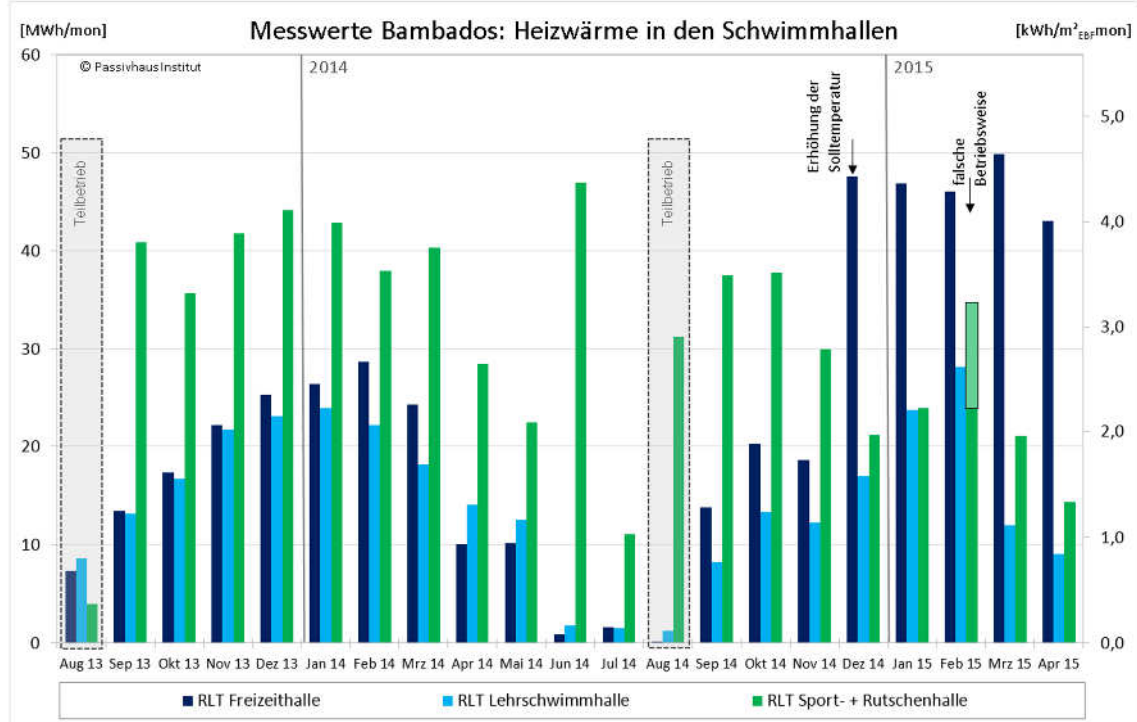


Abbildung 15: Monatlicher Heizwärmeverbrauch zur Heizung der Räume, aufgeteilt nach Zonen (alle drei Diagramme mit gleich Skalierung der y-Achse)

Art der Heizung

Neben der Heizung über die Zuluft gibt es neben dem Sportbecken und im Saunavorraum Wärmebänke. Diese wurden nicht zur Beheizung der Räume gewählt, sondern um eine angenehme Oberflächentemperatur bereitzustellen. Im Betrieb zeigte sich, dass die Wärmebänke im Sportbereich fast nie eingeschaltet wurden und im Saunabereich nur phasenweise. Es ist zu vermuten, dass ein Unterschied in der Oberflächentemperatur wahrgenommen werden kann. Allerdings führte es im Bambados nicht zu Nachfragen oder Beschwerden, wenn die Wärmebänke nicht beheizt wurden. Es spricht energetisch nichts dagegen, wenn ein Teil der Raumwärme durch Wärmebänke gedeckt wird. Allerdings sollte darauf geachtet werden, dass ein erhöhter Wärmeverbrauch auftreten kann, wenn die Wärmebänke zu Zeiten angeschaltet sind, in denen es keine Heizanforderung gibt. Im Zeitraum August 2013 bis einschließlich April 2015 Betrug der Heizenergieverbrauch der Wärmebänke im Mittel unter 0,1 % der gesamten Heizenergie für Raumwärme.

Das Passivhauskonzept hat hohe Oberflächentemperaturen an der Innenseite der Bauteile zur Folge. Aus diesem Grund konnte im Bambados auf eine Fußbodenheizung verzichtet werden. Teilweise wird die Fußbodentemperatur noch durch den warmen darunter liegenden Keller angehoben. Die Praxis zeigt, dass hier keine Wünsche an die Behaglichkeit offen bleiben.

Die Beheizung der Saunakabinen erfolgt durch Gasöfen, die Beheizung des Dampfbades durch Flächenheizung (Fußboden + Bänke) und durch den Dampf (elektrisch). Im Zeitraum August 2013 bis einschließlich April 2015 Betrug der Heizenergieverbrauch der Flächenheizung im Dampfbad im Mittel unter 0,15 % der gesamten Heizenergie für Raumwärme.

5.1.2 Heizwärmeverbrauch für Beckenwasser

Das Beckenwasser wird vom BHKW bzw. den Gasspitzenlastkesseln geheizt. Außerdem besteht noch die Möglichkeit, das Wasser über den Kondensator und Kältemittelunterkühler der Wärmepumpen zu heizen. Im dargestellten Zeitraum erfolgt die Beheizung ausschließlich aus BHKW bzw. Spitzenlastkesseln.

Der Vergleich der gemessenen Verbräuche ist in Abbildung 16 getrennt für die einzelnen Hallenbereiche dargestellt. Auf der linken y-Achse, die für alle drei Hallen gleich skaliert ist, kann der absolute Heizwärmeverbrauch und auf der rechten y-Achse kann jeweils der spezifische Heizwärmeverbrauch pro m² Beckenfläche abgelesen werden. In den Hallen Freizeit und Lehrschwimmbecken wird zur Beheizung des Beckens mehr Energie verbraucht als für die Beheizung der Luft. Erst ab dem Zeitpunkt, an dem die Solltemperatur der Raumluft im Freizeitbereich von 32 °C auf 34 °C erhöht wurde, dreht sich das Verhältnis teilweise um.

Im Sportbereich stellt sich die Situation anders dar. Das Sportbecken wird mit einer Solltemperatur von 27 °C betrieben und hat damit einen äußerst geringen Heizwärmeverbrauch. Dies deckt sich auch mit den Messungen im Lippe Bad in Lünen [Peper / Grove-Smith 2013]. Verschiedene Ursachen werden hier vermutlich zusammenwirken:

- Da der Keller wärmer ist als das Beckenwasser, gibt es keine Transmissionsverluste, sondern -gewinne.
- Das Beckenwasser im Rohrnetze und im Schwallwasserbehälter wird durch den warmen Keller erwärmt.

- Das Frischwasser wird durch den warmen Keller und die Abwärme der Pumpen bereits erwärmt. Aufgrund der niedrigen Solltemperatur des Beckens muss nur noch eine kleine bzw. keine Temperaturdifferenz überwunden werden.



Abbildung 16: Vergleich des Heizwärmeverbrauchs für Becken und Raumluft aufgeteilt auf die drei Hallenbereiche. (Die linke y-Achse mit den Absolutwerten ist in allen drei Diagrammen gleich skaliert, auf der rechten y-Achse ist jeweils der Verbrauch pro m² Beckenfläche dargestellt.)

Der Heizwärmeverbrauch der Becken zeigt keine jahreszeitlichen Schwankungen. Das heißt, die Energiemenge, die zum Aufheizen des Frischwassers benötigt wird, ist untergeordnet. Dies deckt sich auch mit den Berechnungen: Ca. ein Fünftel der Energie wird zur Erwärmung des Frischwassers und ca. vier Fünftel werden zum „Erhalt“ der Beckentemperatur benötigt. In Abbildung 17 wird die Veränderung des Heizwärmeverbrauchs für Luft und Becken für alle Hallen dargestellt. Einige Änderungen in der Betriebsweise sind deutlich zu erkennen (siehe Erklärungen unten). Andere Veränderungen (z.B. in der Verdunstung) haben selbst in Stundendaten keine erkennbaren Auswirkungen.

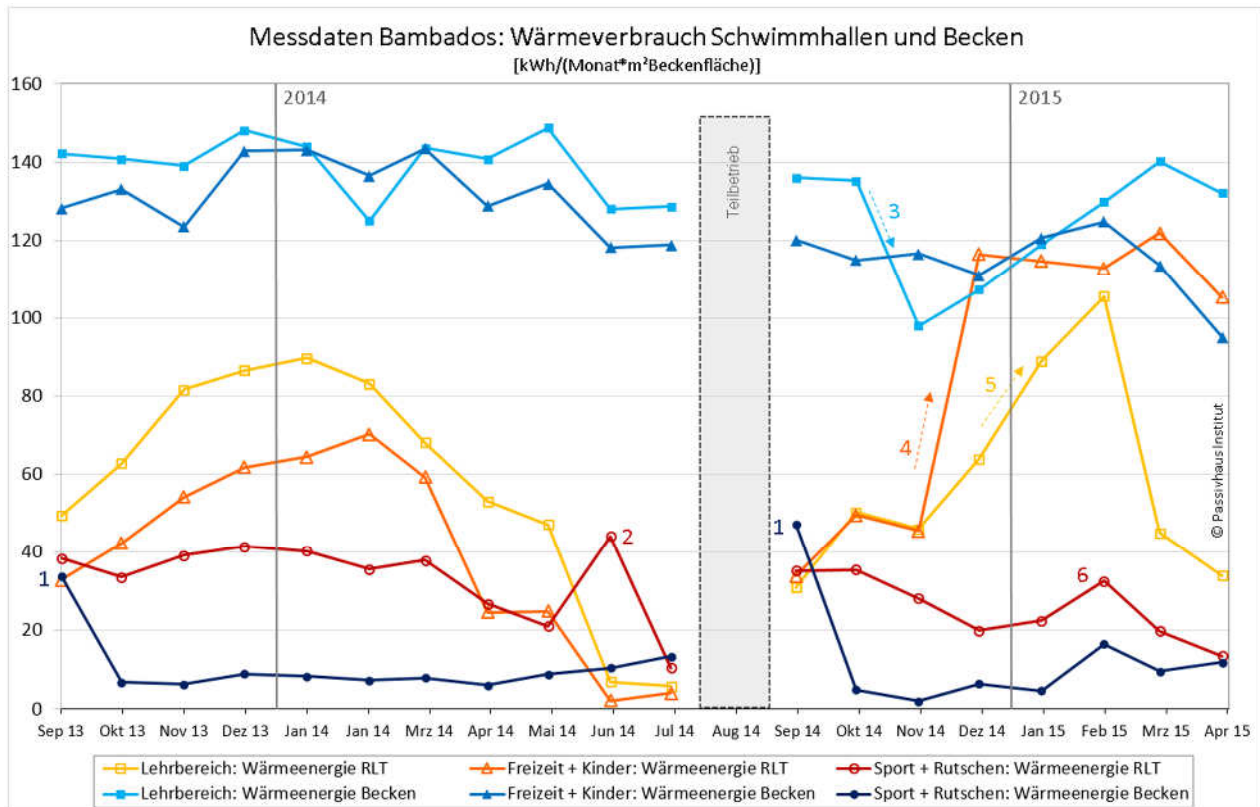


Abbildung 17: Vergleich der Heizwärmeverbräuche der Schwimmhallen und Becken (Erklärungen der Veränderungen siehe unten)

Erklärungen zu Abbildung 17 (nach Nummern zugeordnet):

1. Erhöhter Wärmeverbrauch zum Aufheizen des Beckens nach Sommerpause
2. Technischer Defekt, sodass die Luft teilweise auf 36 °C geheizt wurde
3. Die Temperatur des Lehrschwimmbeckens sinkt, was einen geringeren Heizwärmeverbrauch zur Folge hat.
4. Die Solltemperatur der Freizeithalle wurde auf Wunsch der Gäste von 32 °C auf 34 °C angehoben. Dadurch steigt der Heizwärmebedarf auf mehr als das Doppelte.
5. Die Regelung der Lüftungsgeräte Lehrschwimmbecken ist nicht korrekt ausgeführt, was daran zu erkennen ist, dass teilweise auch ohne Entfeuchtungsbedarf ein erhöhter Volumenstrom gefahren wurde. Zur Folge steigt auch der Heizwärmeverbrauch deutlich an.

6. Nach der Wartung der Lüftungsgeräte wurde eines der Sport-Lüftungsgeräte mit erhöhtem Volumenstrom betrieben. Dadurch stiegen die Lüftungsverluste und der Heizwärmeverbrauch.

Durch eine Schlammwasseraufbereitung kann ein Teil des Filtrerrückspülwassers wiederverwendet werden. Dadurch werden gleichzeitig der Wasserverbrauch und der Heizwärmeverbrauch reduziert. Für eine detaillierte Auswertung stehen leider keine Daten zur Verfügung.

5.1.3 Heizwärmeverbrauch für Trinkwarmwasser (Duschen)

Warmes Wasser wird hauptsächlich zum Duschen und in geringeren Mengen für die Küche und zum Putzen verwendet. Da es im Bambados drei unabhängige Systeme zur Warmwasserbereitung gibt (siehe Kapitel 2), lässt sich der Wasser- und Energieverbrauch für die Bereiche Freizeitduschen, Sportduschen und Saunaduschen detailliert auswerten. Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass die Warmwasserbereitung der Sauna auch die Küche mit versorgt.

Abbildung 18 zeigt, dass der absolute Wasserverbrauch vor allem in den Freizeit- und Sportduschen jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt, wobei der Verbrauch im Winter höher ist. Dies korreliert mit höheren Besucherzahlen im Winter. Es stellt sich die Frage, ob es noch weitere Einflüsse gibt. Abbildung 19 zeigt den Wasserverbrauch pro Person: Es besteht eine leichte Tendenz zu höherem Verbrauch, d.h. zu längeren Duschzeit pro Person im Winter. Der Wasserverbrauch in den Saunaduschen schwankt weniger stark (ca. 10 – 21 l/Person bei 60 °C) und ist deutlich unter dem Duschwasserverbrauch der Freizeit- und Sportgäste (ca. 15 – 44 l/Person bei 60 °C), obwohl sogar der Warmwasserbedarf der Küche in der Ermittlung des Wasserverbrauchs der Saunaduschen enthalten ist.

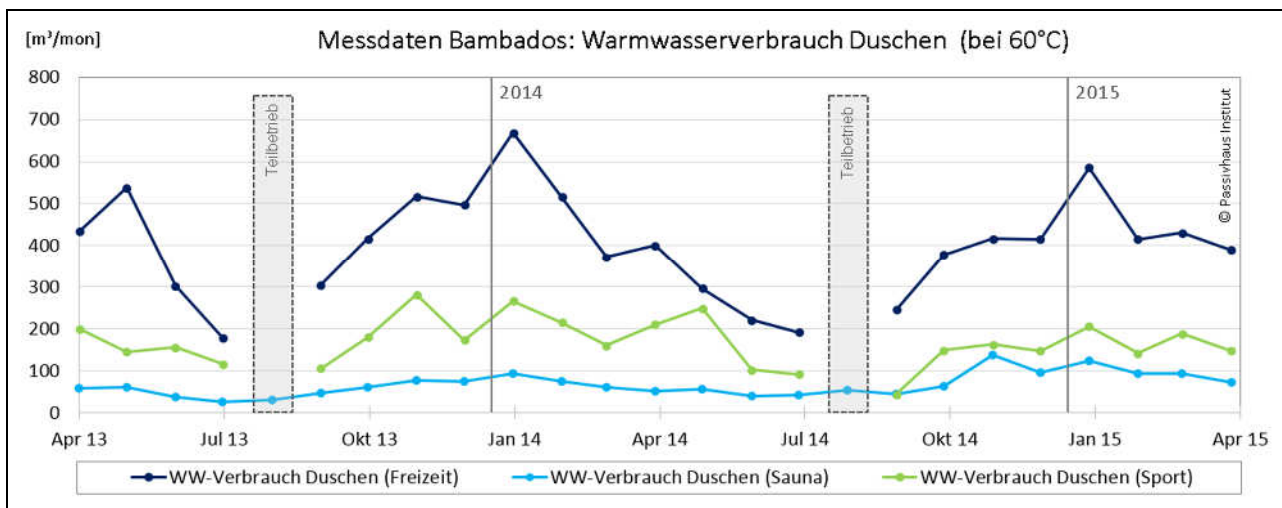


Abbildung 18: Absoluter Warmwasserverbrauch für die Trinkwarmwasserbereitung (Nutzung hauptsächlich für Duschen)

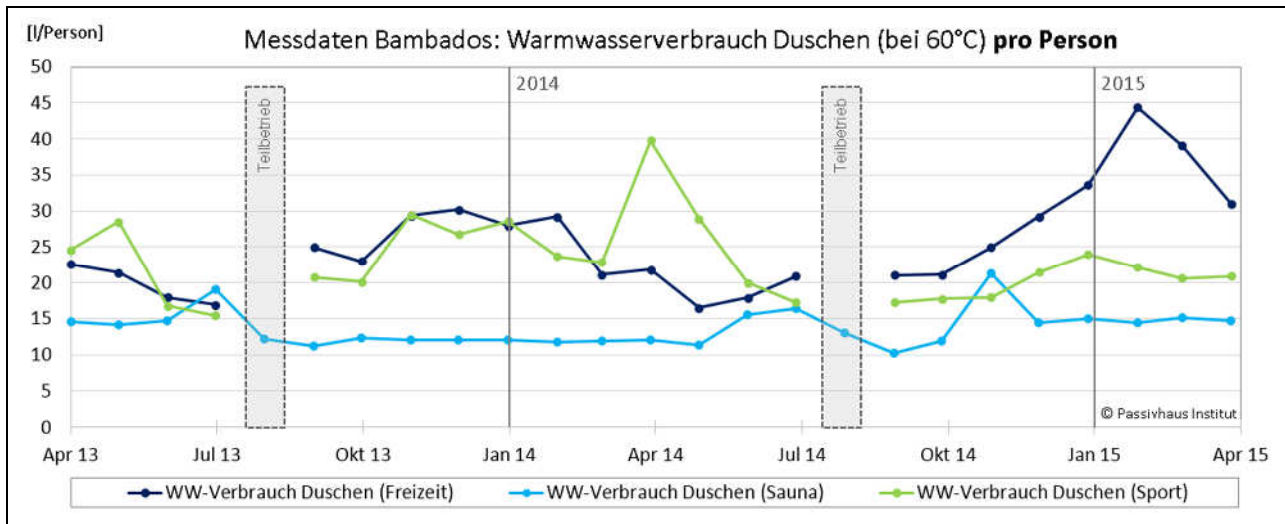


Abbildung 19: Spezifischer Warmwasserverbrauch für die Trinkwarmwasserbereitung (Nutzung hauptsächlich für Duschen)

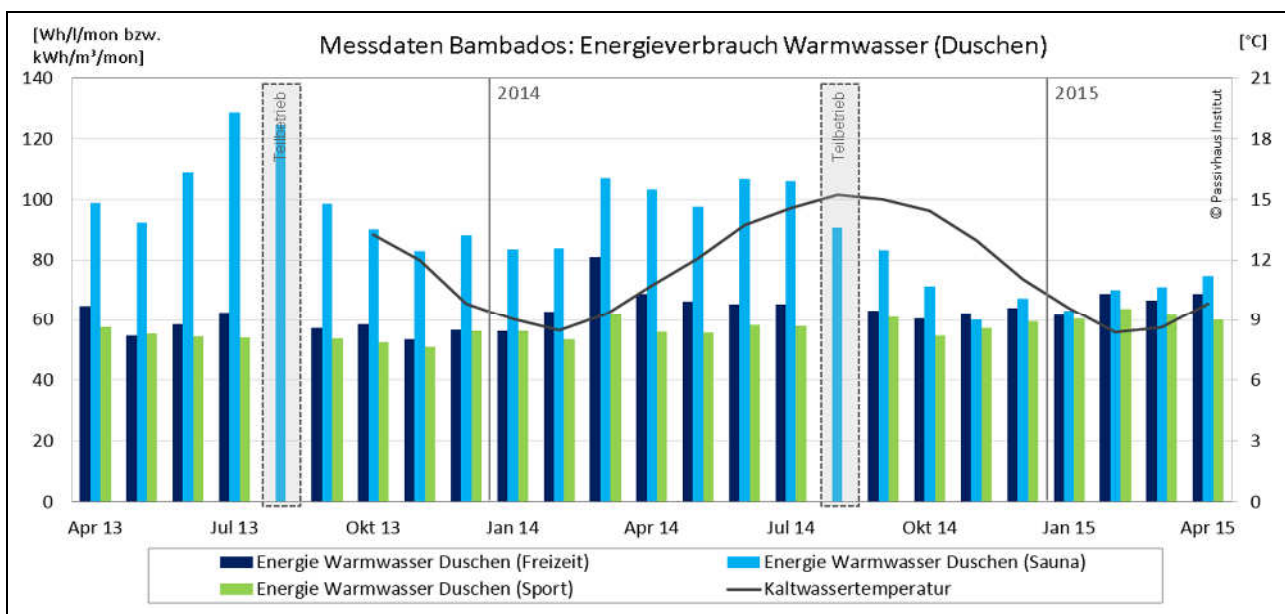


Abbildung 20: Energieverbrauch für die Trinkwarmwassererwärmung (Nutzung hauptsächlich für Duschen)

Der spezifische Energieverbrauch zur Erwärmung des Warmwassers wird in Abbildung 20 dargestellt. Es zeigt sich ein relativ gleichmäßiger Energieverbrauch pro Liter zwischen 50 und 70 Wh/l bzw. kWh/m³. Ausreißer ist die Warmwasserbereitung der Sauna bis Herbst 2014. Danach steigen die Besucherzahlen des Saunabereichs und damit die Effizienz der Warmwasserbereitung.

Stellt man den gesamten Warmwasserverbrauch der Saunawarmwasserbereitung der benötigten spezifischen Energie gegenüber (siehe Abbildung 21), zeigt sich ein umgekehrtes Verhältnis. Bei geringerem Wasserdurchsatz steigt der spezifische Energieverbrauch u.a. aufgrund von Speicher- und Verteilverlusten. Steigt der Wasserdurchsatz, steigt die Effizienz des Systems. Bei der Warmwasserbereitung für Sport- bzw. Freizeitduschen ist diese Abhängigkeit weniger deutlich zu erkennen, weil der Anteil der Speicher- und Verteilverluste bei höheren Wassermengen und kürzeren

Verteilungen geringer ist. In jedem Fall ist darauf zu achten, die Verteil- und Speicherverluste zu minimieren.

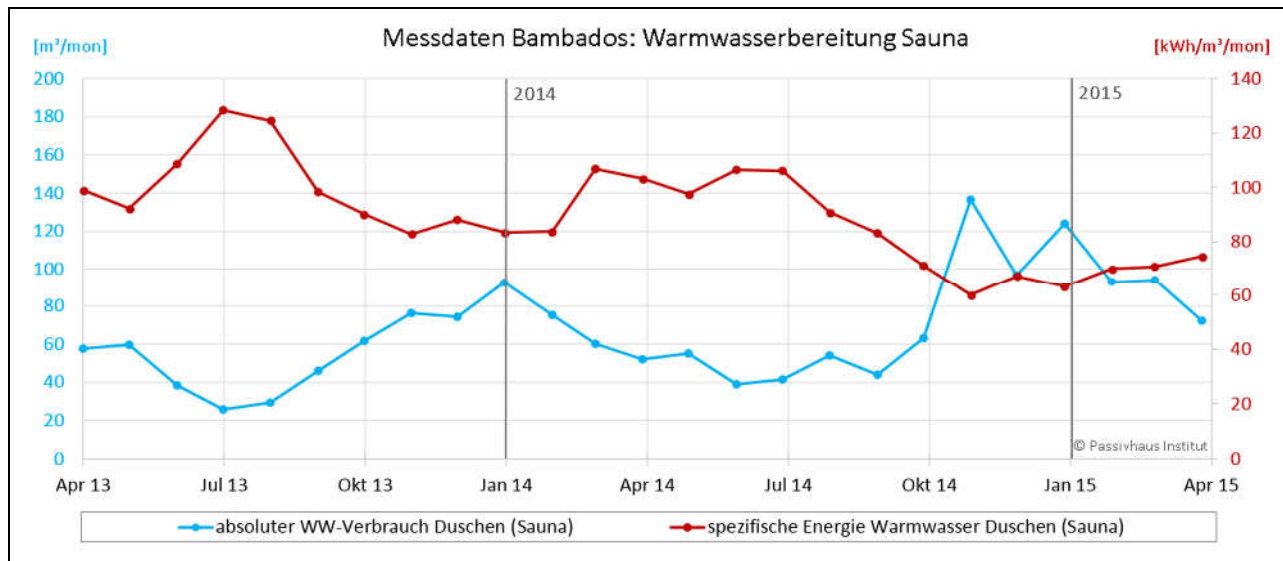


Abbildung 21: Warmwasserbereitung für die Duschen im Saunabereich (enthält auch das Warmwasser für die Küche)

Aufgrund von Erfahrungen anderer Projekte wurde nachträglich im Hausanschlussraum ein Sensor am Kaltwasserzufluss montiert. Die Auswertung zeigt, dass die Kaltwassertemperatur starken jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt (ca. zwischen 8 °C und 15 °C, Mittelwert 12 °C). Eine Korrelation zwischen Kaltwassertemperatur und Energieverbrauch zeigt sich hier jedoch nicht. Das heißt, es überlagern sich verschiedene Einflüsse. Das kalte Wasser wird auf dem Weg zum Wärmetauscher teilweise durch die umgebende Raumluft vorerwärmt und die Speicher- und Verteilverluste fallen vermutlich mehr ins Gewicht als die Kaltwassertemperatur.

Für die Energiebilanz wurde eine Duschzeit von 3 Minuten, eine Armatur mit 8 l/min Durchfluss und damit einen Wasserverbrauch von 24 Liter pro Person mit 40 °C angesetzt. Gemessen wurde nur die Wassermenge, mit der die Warmwasserspeicher gefüllt werden. Grob abgeschätzt ergibt das eine tatsächlichen Wasserverbrauch von 40 bis 50 Liter Warmwasser mit 40 °C pro Person. Für eine genauere Analyse wurde am 28.07.2015 vor Ort eine Messung von sechs Duschköpfen vorgenommen (siehe nachfolgende Tabelle). Die Duschen laufen bei einem Knopfdruck im Durchschnitt um die 26 Sekunden mit einem Durchfluss von 14 l/min. Das ergibt eine durchschnittliche rechnerische Duschlänge von ca. 3 Minuten. Die Abweichung des Wasserverbrauchs gegenüber der Planung ist eindeutig dem Durchfluss der Duschen zuzuschreiben. Eine Optimierung wäre wünschenswert.

Bei der Messung war auffallend, dass einzelne Duschen sowohl in der Länge des Intervalls als auch im Durchfluss stark abweichen. Wegen starker Verkalkung einzelner Duschköpfe wird die Funktion der Duschen jeden Tag kontrolliert. Die Messung fand unmittelbar vor der Revision statt. Um die Verkalkung der Duschköpfe zu reduzieren, ist geplant, eine Entkalkungsanlage zu installieren. Eventuell wird sich dadurch der Durchfluss nochmal erhöhen.

Tabelle 4: Messung der Duschwassermengen und -zeiten an sechs exemplarischen Duschköpfen

	Wassermenge [l]	Dusch- intervall [s]	berechneter Durchfluss [l/min]
Duschen Freizeit			
	6,0	26,6	14
	1,8	25,9	4
	6,5	26,3	15
Duschen Sport			
	1,3	5,7	14
	6,0	26,5	14
	6,5	27,2	14

5.2 Stromverbrauch

Die Stromversorgung des Bambados erfolgt - wie auch der Betrieb des Bades - durch die Stadtwerke Bamberg. Dabei wird ein Teil des verbrauchten Stromes durch das angegliederte Holzgas-BHKW sowie die Photovoltaikanlage auf dem Dach bereitgestellt. Im folgenden Abschnitt werden die unterschiedlichen Verbrauchsbereiche dargestellt und analysiert. Messzeitraum des elektrischen Stromverbrauchs erstreckt sich - soweit nicht anders vermerkt - von August 2012 bis April 2015.

5.2.1 Gesamtverbrauch und -erzeugung

Der Jahresstromverbrauch für das Hauptgebäude und alle Anwendungen im Außenbereich (Außenbecken, Außensauna, Parkplatz etc.) beläuft sich im Jahreszeitraum von Mai 2014 bis April 2015 auf 2.095 MWh, entsprechend spezifisch 195 kWh/(m²_{EBFA}).

Der Strom wird mit Unterzählern gemessen, getrennt nach den Bereichen Badewassertechnik, Lüftung, Beleuchtung, Divers (sonstige Technik und restliche Verbraucher inkl. Küche, Sauna, Verwaltung, Kassen etc.) und Außenanwendungen. Der Jahresstromverbrauch ist in Abbildung 22 verglichen mit der Stromerzeugung durch die Photovoltaikanlage auf dem Dach und das angegliederte Holzgas-BHKW im selben Zeitraum dargestellt.

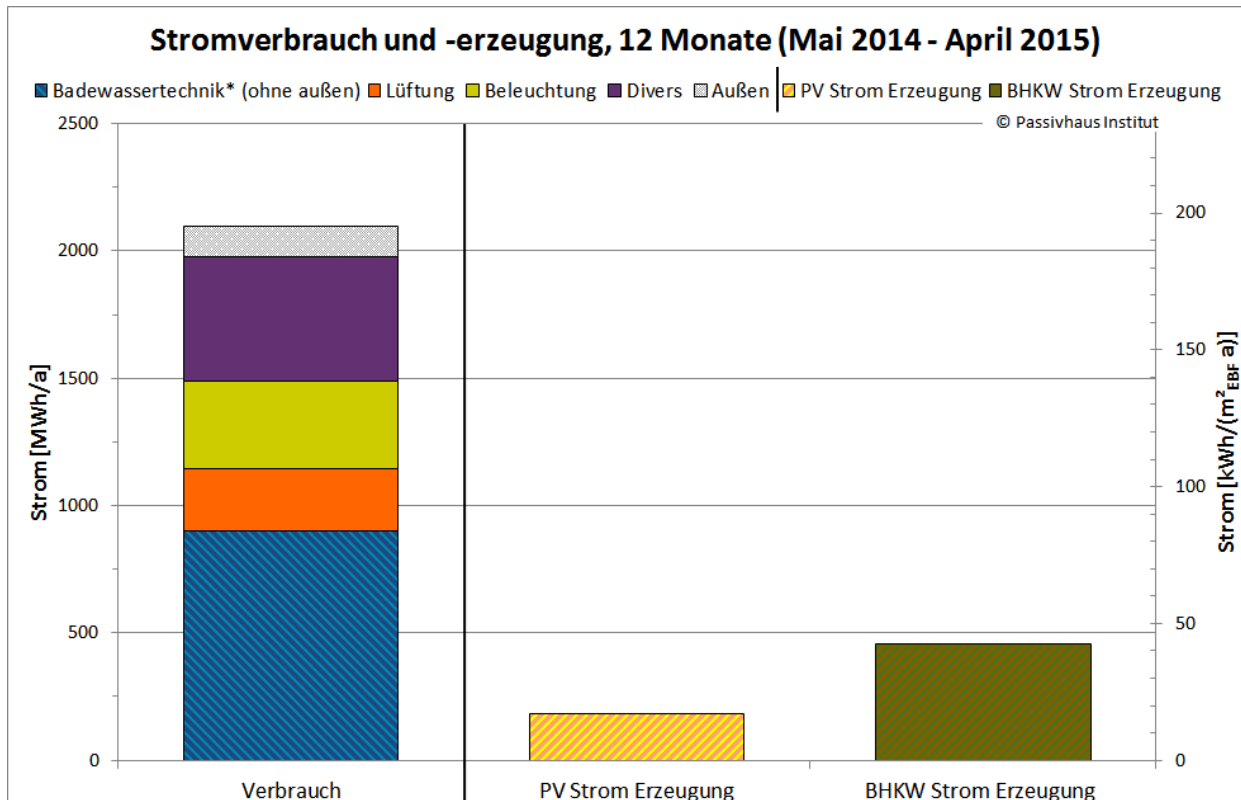


Abbildung 22: Gesamtstromverbrauch unterschieden nach Anwendungen im Gebäude und Außenbereich (Außenbecken, Außensauna, Parkplatz etc.) für den Jahreszeitraum von Mai 2014 bis April 2015 verglichen mit der Stromerzeugung durch Photovoltaik und Holzgas-BHKW. Der gesamte erzeugte Strom wurde unmittelbar im Bambados verbraucht. (*Beim Verbrauch der Badewassertechnik handelt es sich um eine geprüfte Hochrechnung. Siehe Kapitel 5.2.2)

Bei den Bereichen Lüftung und Beleuchtung handelt es sich um detaillierte Direktmessungen des Stromverbrauches. Die gesamten Anwendungen außerhalb der Gebäudehülle werden ebenso direkt gemessen und beinhalten einen Zuschlag für die Badewassertechnik des Außenbeckens, der anhand eines nachgeführten Planungswertes ermittelt wurde, da diese nicht separat gemessen wurde. Der Verbrauch für den Teilbereich „Divers“ setzt sich zusammen aus Zählermesswerten und einem marginalen Rest, der indirekt als Differenz zum Gesamtverbrauchgebildet wird. Die Badewassertechnik wurde nicht separat durch Stromzähler erfasst (siehe Abschnitt „Stromverbrauch nach Teilbereichen“). Die angegebenen Jahres- und Monatssummen stimmen in allen Fällen mit dem realen gemessenen Gesamtverbrauch des Bades überein.

Die Stromerzeugung betrug im Jahreszeitraum von Mai 2014 bis April 2015 insgesamt 640 MWh, wovon 185 MWh auf Solarstrom und 455 MWh auf Strom des BHKWs entfallen. Der verbleibende Rest wurde aus dem örtlichen Stromnetz bezogen. Der erzeugte Strom (PV und BHKW) wurde laut Betreiber ausnahmslos direkt im Bambados verbraucht. Anschlusstechnisch ist bei Bedarf jedoch auch eine Einspeisung ins örtliche Stromnetz möglich.

In Abbildung 23 ist der monatliche Verlauf des Gesamtstromverbrauches der unterschiedlichen Anwendungsgruppen dargestellt. Zeiträume, in denen die jährliche Revision und kein regulärer Betrieb stattfanden, sind grau unterlegt.

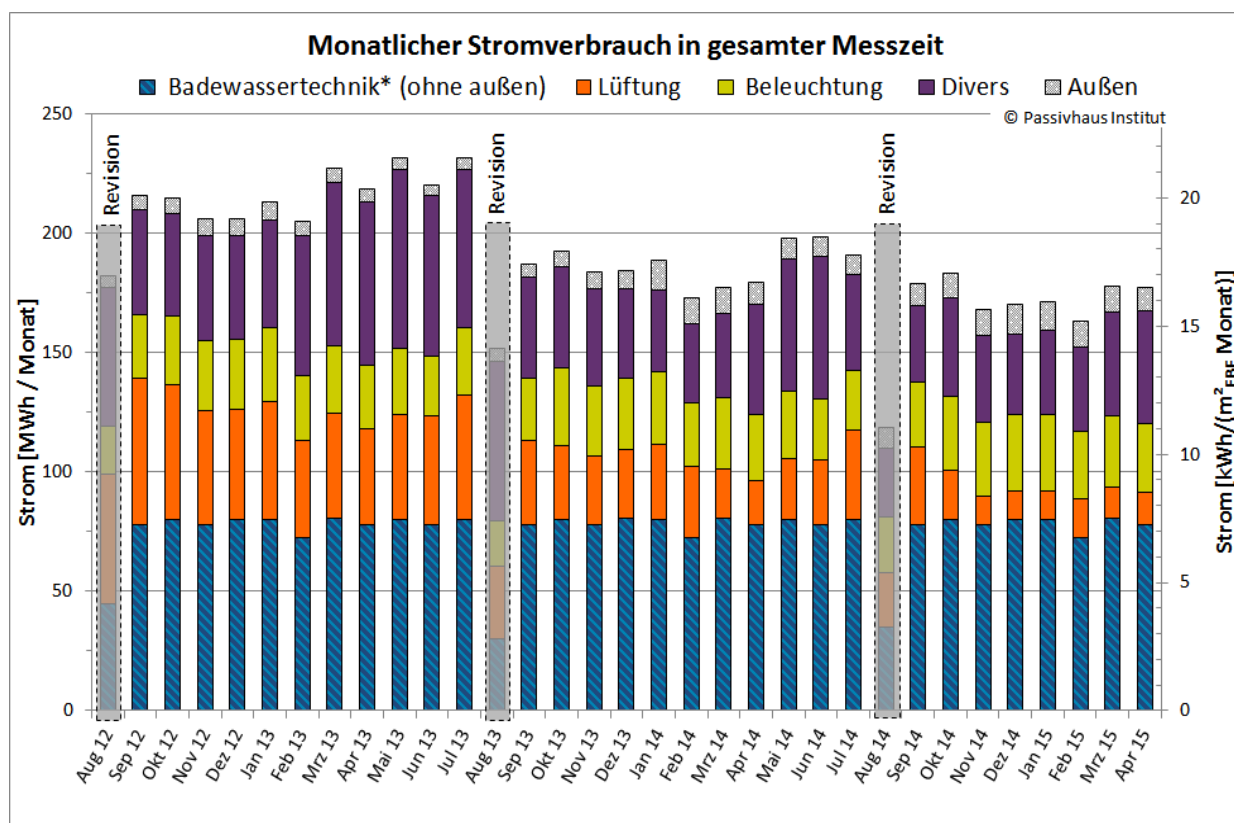


Abbildung 23: Monatlicher Gesamtstromverbrauch unterschieden nach Anwendungen im Gebäude und Außenbereiche (Außenbecken, Außensauna, Parkplatzbeleuchtung etc.) für den Zeitraum von August 2012 bis April 2015 (*Beim Verbrauch der Badewassertechnik handelt es sich um eine geprüfte Hochrechnung. Siehe Kapitel 5.2.2)

5.2.2 Stromverbrauch nach Teilbereichen

Lüftung

Wie in Kapitel 2 beschrieben, verfügt das Gebäude über elf Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung mit einem möglichen maximalen Gesamtvolumenstrom von bis zu 210.000 m³/h. Die Stromverbräuche aller Geräte, inklusive herstellerseitiger Messtechnik, Steuerung und Regelung, werden detailliert gemessen. Wie anhand der monatlichen Stromverbräuche der Lüftungsgeräte der Schwimmhallen und der Nebenbereiche in Abbildung 24 zu erkennen ist, ließ sich deren Stromverbrauch durch Regelungsoptimierungen deutlich reduzieren. Die Details zur erfolgreichen Lüftungsoptimierung sind in 5.7 „Lüftung Halle “ beschrieben. Der Gesamtstromverbrauch aller Lüftungsgeräte betrug 244 MWh/a im Jahreszeitraum (Mai 2014 bis April 2015). Das entspricht 12 % des Gesamtstromverbrauches im diesem Zeitraum.

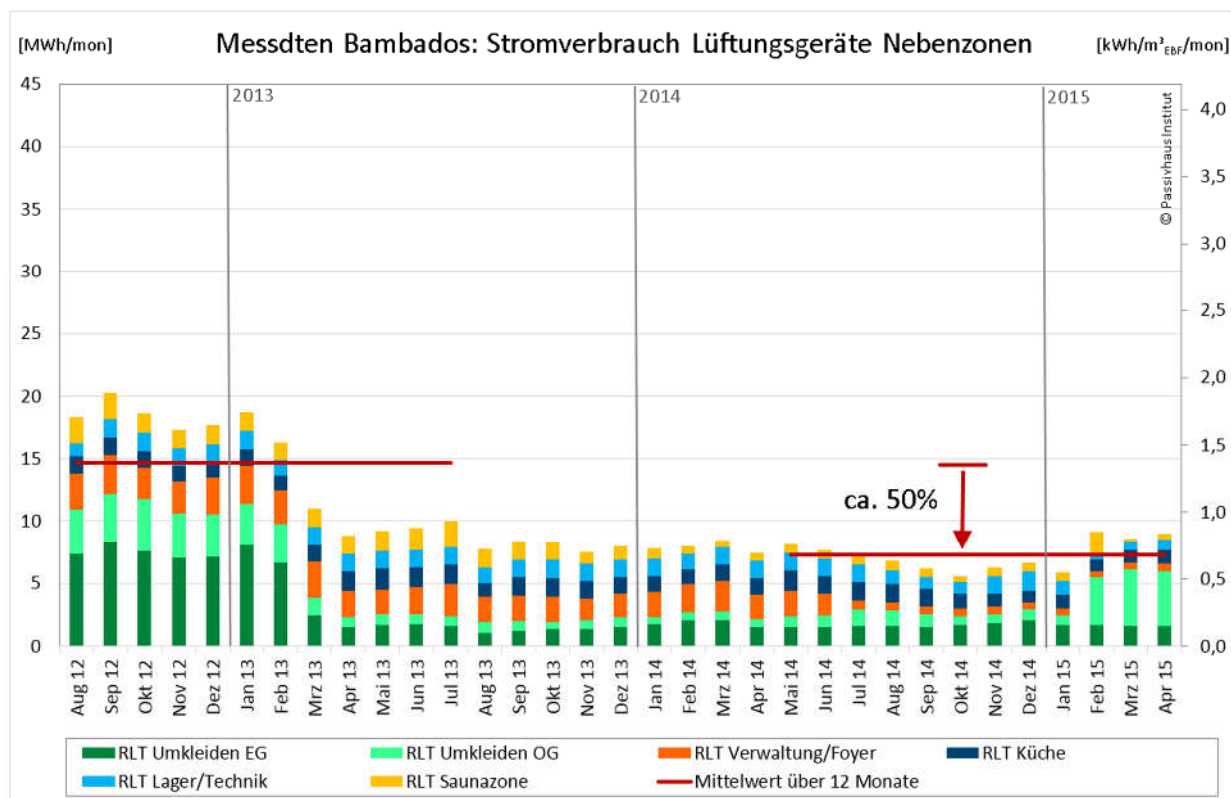
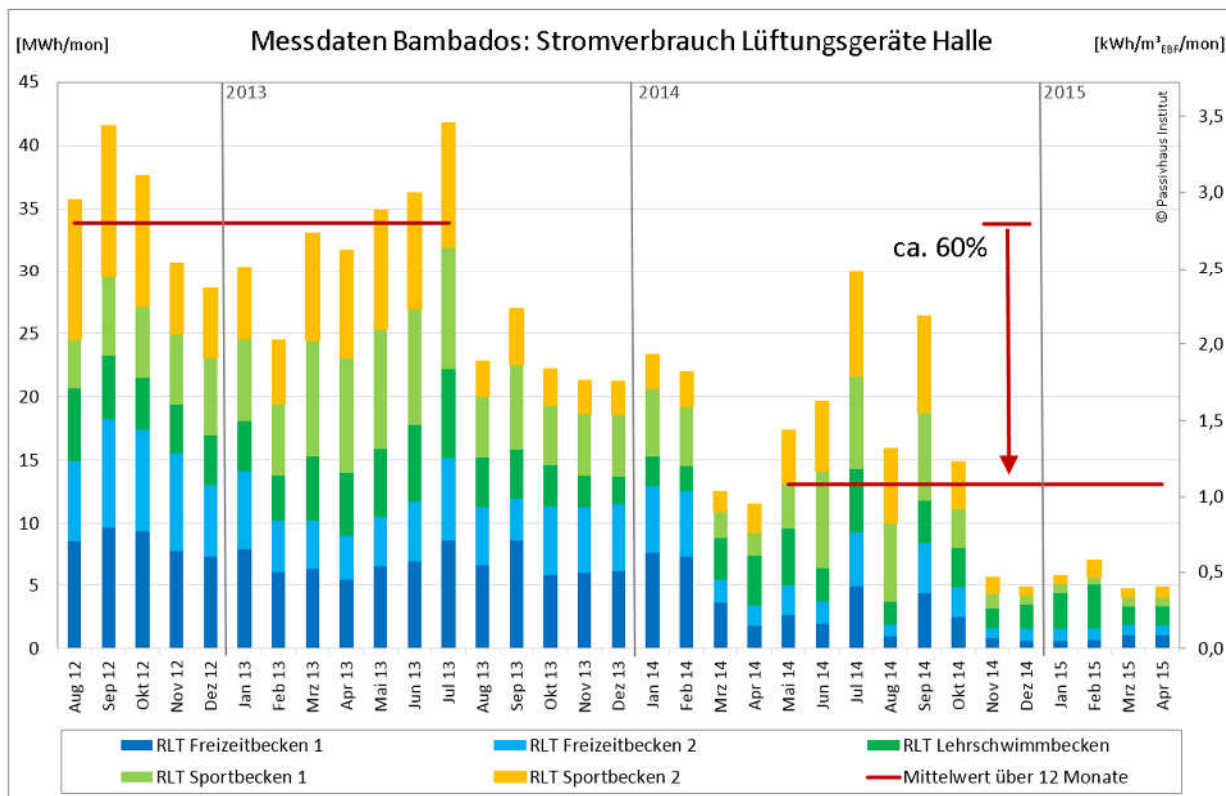


Abbildung 24: Stromverbrauch der Lüftungsgeräte: Der Verbrauch konnte sowohl für die Schwimmhalle (s. oberes Diagramm) als auch für die Nebenzonen (s. unteres Diagramm) gesenkt werden. (Beide Diagramme haben den gleichen Maßstab. In Rot dargestellt sind die durchschnittlichen Monatswerte gemittelt jeweils über ein Jahr)

Beleuchtung

Im Gebäude wurden weitgehend effiziente T5 Leuchtstoffröhren bzw. LED Lampen eingesetzt. Damit konnte in der Planung eine gute Energieeffizienz mit einem geplanten Mittelwert (nach Fläche und Beleuchtungsstärke gewichtet) von 2,37 W/(m²*100lx) erreicht werden. Für die gesamte Beleuchtung des Bambados wurden im Jahreszeitraum (Mai 2014 bis April 2015) 343 MWh/a Strom verbraucht. Das entspricht 16 % des Gesamtstromverbrauches im diesem Zeitraum. Die Messung des Stroms für die Beleuchtung erfolgt im Bambados für die einzelnen Zonen separat - mit Ausnahme der Beleuchtung von Gastronomie und Spabereich, die einen marginalen Anteil ausmachen. Die Außenbeleuchtung ist dem Teilbereich „Außen“ zugeordnet mit Ausnahme der Beleuchtung des Außenbeckens. Diese ist auf dem Beleuchtungszähler des Sportbereiches mit aufgelegt und wird damit hier berücksichtigt. Der Stromverbrauch unterschieden nach Teilbereichen ist im folgenden Diagramm dargestellt.

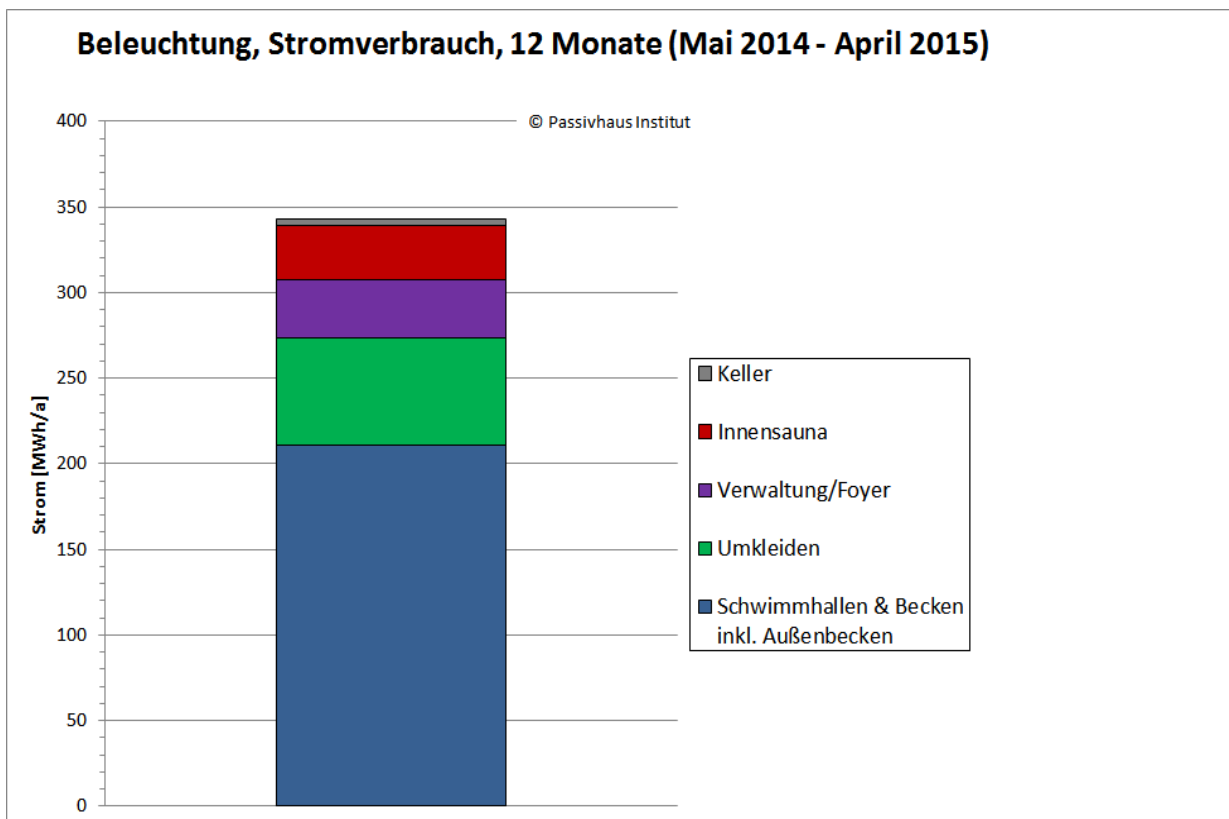


Abbildung 25: Stromverbrauch der Beleuchtung unterschieden nach Teilbereichen im Gebäude (ohne Außenbereiche, Spabereich und Gastronomie) für den Jahreszeitraum von Mai 2014 bis April 2015.

Es zeigt sich die Dominanz der Beleuchtung der Hallenbereiche mit 59 % Anteil am Beleuchtungsverbrauch, welche auch den größten Anteil des Gebäudes ausmachen. Deutlich fällt der zweithöchste Teilverbrauch für die Umkleiden mit 21 % aus. Die verbleibenden 19 % werden zusammen von den Bereichen Verwaltung/Foyer, Innensauna und Keller verbraucht.

Zur Erstellung der Energiebilanz in der Planungsphase wurden Betriebsstunden für die Beleuchtung angesetzt. Diese können den Messergebnissen gegenüber gestellt werden (siehe Tabelle).

Tabelle 5: Gemessene (Tag und Nacht, 0-24 Uhr & während Öffnungszeiten, 7-23 Uhr) sowie während der Planungsphase abgeschätzte Volllaststunden (0-24 h) der Beleuchtung

Beleuchtung Jahreszeitraum (Mai 2014 – April 2015)	Schwimmballen & Becken inkl. Außenbecken	Umklei- -den	Verwaltung / Foyer	Innensauna	Keller
Volllaststunden/Jahr gemessen (0-24 h)	6283	7132	4660	5319	3768
Volllaststunden/Jahr gemessen (7-23 h)	4288	5140	3136	3464	3182
Volllaststunden/Jahr geplant (0-24 h)	4440	4063	3707	3085	1701

In der Planungsphase wurde davon ausgegangen, dass die Beleuchtung zum Großteil nachts ausgeschaltet sein wird. Die Gegenüberstellung zeigt, dass sich die während der Öffnungszeiten (7-23 h) gemessenen Volllaststunden relativ gut mit den Werten decken, die in der Planungszeit für ganze 24 h angenommen wurden. Dies gilt nicht für den Keller. Da dieser aber eine vergleichsweise sehr geringe Beleuchtungsleistung aufweist, fällt dies im Gesamtverbrauch kaum ins Gewicht. Die Werte der gesamten gemessenen Volllaststunden (0-24 h) liegen viel höher als die geplanten. Die Beleuchtung wird damit deutlich länger betrieben als in der Energiebilanz angesetzt. Dies deutet darauf hin, dass in den Zeiten außerhalb der Öffnungszeiten deutliches Potential zur Verminderung der Beleuchtungsnutzung besteht.

Das Ein- und Ausschalten der elektrischen Beleuchtung erfolgt über verschiedene Zeitprogramme und eine Tageslichtsteuerung, die in der GLT implementiert sind, kann aber bei Bedarf auch manuell geschehen. Der Einfluss der Tageslichtsteuerung lässt sich deutlich am Rückgang der Beleuchtungsleistungen während der Mittagszeit in den Bereichen der Schwimmballen, der Innensauna und von Verwaltung und Foyer erkennen (siehe Abbildung 26, gelbe Markierungen). Es zeigt sich jedoch auch, dass außerhalb der Öffnungszeiten teilweise die Beleuchtung für alle Bereiche (außer Keller) vollständig eingeschaltet wird. Das Zeitschaltprogramm sieht zumindest eine weitgehende Abschaltung zwischen 23:00 und 1:45 vor, was in der Nacht vom 08. zum 09.03.2014 zu sehen ist. In der vorherigen Nacht wurde dies wahrscheinlich durch die Reinigungskräfte übersteuert. Ab 1:45 bis zur Öffnung des Bades wird eine nahezu volle Beleuchtung in allen Bereichen (außer Keller) eingesetzt. Da nicht gleichzeitig in allen Bereichen während dieser ganzen Zeit gereinigt wird, ist für die Zukunft eine bedarfsorientierte Anpassung der Putzbeleuchtung zur weiteren Stromeinsparung angeraten – insbesondere in den Hallen- und Umkleidebereichen, die die höchste Beleuchtungsleistung aufweisen.

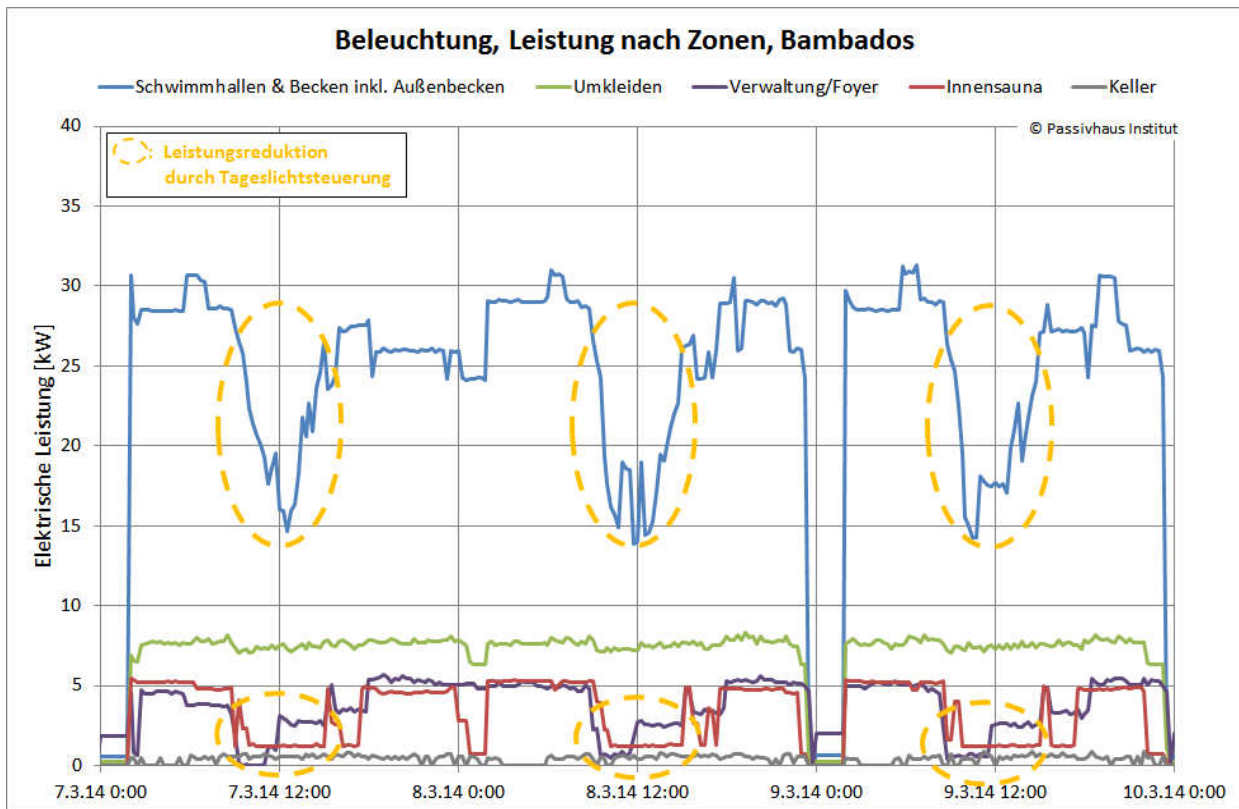


Abbildung 26: Verlauf der elektrischen Leistung der Beleuchtung aufgeteilt nach Zonen über exemplarische 72 Stunden. Gelb markiert ist die tageslichtgesteuerte Reduktion der Beleuchtungsleistung für die Bereiche der Schwimmhallen, der Innensauna sowie von Verwaltung und Foyer.

Badewassertechnik

Zur Badewassertechnik (siehe auch Kapitel 5.10) zählen alle Umwälz- und Wärmetauscherpumpen der Beckenwasserkreisläufe sowie die Großpumpen für Rutschen und Attraktionen (Strömungskanal, Schwallwasserduschen, Massagedüsen etc.) als auch Dosierpumpen und Kleinverbraucher, wie z.B. chemische Messzellen. Diese Verbraucher befinden sich im Keller des Gebäudes. Da der Stromverbrauch der Badewassertechnik nicht über eigene Zähler erfasst wird, wurde eine ergänzende Messung durchgeführt. Dazu wurden mithilfe eines Netzstromanalysators (Fluke 1735 Power Logger mit flexiblen Stromwandlern und direkten Spannungsabgriffen) zwölf Tage lang die Ströme und Spannungen an den Zuleitungen des Schaltschranks, auf dem alle elektrischen Verbraucher der Badewassertechnik aufgeschaltet sind, gemessen und daraus die Wirkleistungen und Wirkenergien (Stromverbräuche) berechnet. Der Verlauf der Wirkleistung ist in Abbildung 27 dargestellt.

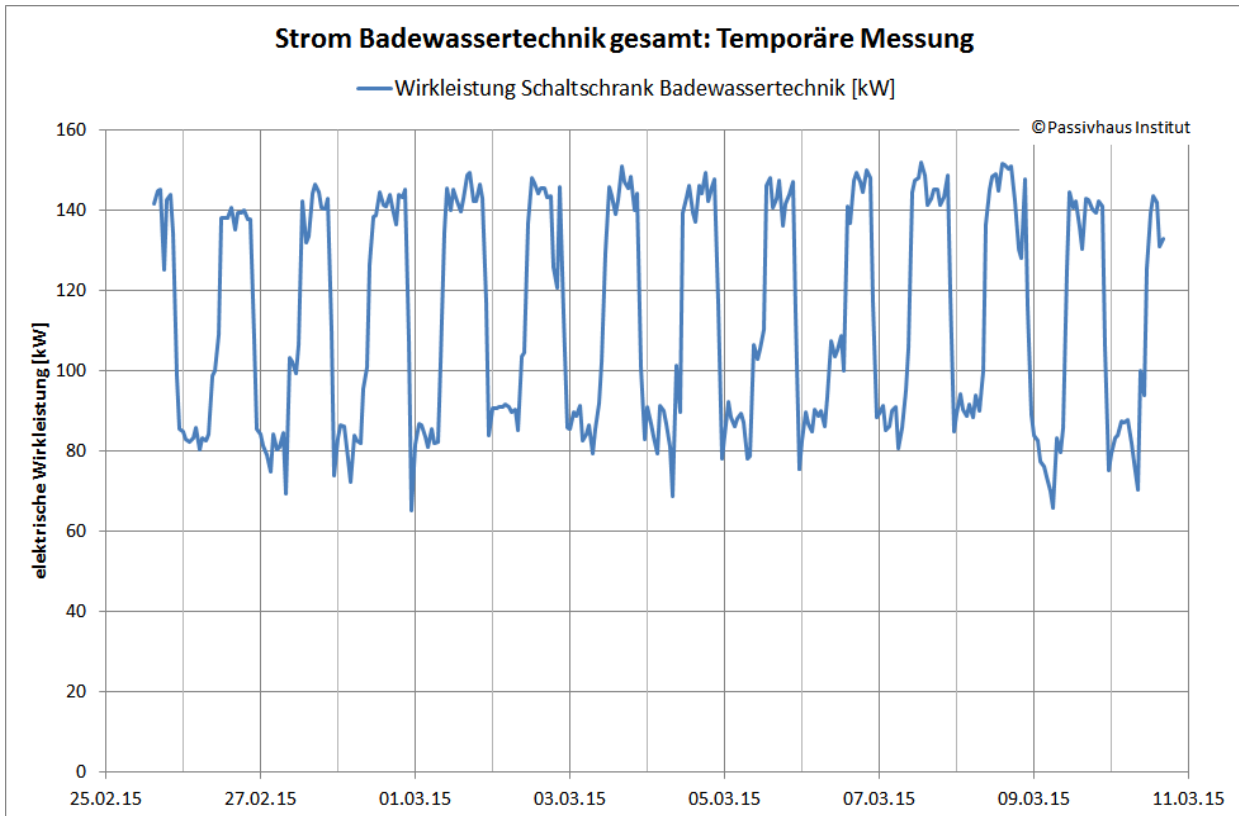


Abbildung 27: Temporäre Stromverbrauchsmessung des Schaltschranks der gesamten Badewassertechnik. Dargestellt ist der Verlauf der Gesamtwirkleistung aller drei Phasen der Zuleitung des Schaltschranks der Badewassertechnik gemessen mit einem Netzstromanalysator über einen Zeitraum von zwölf Tagen.

Die Zusatzmessung zeigt deutlich die Tag-Nacht-Schwankungen der elektrischen Leistung der Badewassertechnik. Tagsüber werden Spitzen bis 150 kW erreicht. Während der Nachtstunden (22 bis 9 Uhr) werden zwischen 80 und 90 kW benötigt. Dies ist bedingt durch das nächtliche Abschalten der Rutschen- und Attraktionspumpen sowie die internen Beckenumwälzungen, die nachts erfolgen.

Da die Badewassertechnik, bis auf den Monat der Revision, das ganze Jahr eine weitgehend konstante Fahrweise mit Tag-Nacht-Betrieb und Filtrerrückspülungen in gleichen Intervallen aufweist, können anhand der exemplarischen Messung Werte für den monatlichen Stromverbrauch abgeschätzt werden. Ein Abgleich erfolgt mit den im Hinblick auf den realen Betrieb nachgeführten Bedarfswerten aus der Planung. Dabei zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung (94 %). Der aus den Messdaten hochgerechnete Gesamtstromverbrauch für den Jahreszeitraum (Mai 2014 bis April 2015) beträgt ca. 900 MWh/a. Das entspricht 43 % des Gesamtstromverbrauches des Bades in diesem Zeitraum.

Außen

Unter dem Teilbereich „Außen“ sind alle elektrischen Außenanwendungen erfasst. Im Rahmen dieses Pilotprojektes wurden die Energieeffizienz-Potentiale in diesem Bereich nicht näher betrachtet, es bestehen daher vermutlich weitere Einsparpotentiale. Sie setzen sich zusammen aus dem Verbrauch von

- elektrischer Gehwegheizung,
- Außensaunabereich mit Lüftungsgerät,
- Badewassertechnik Außenbecken und
- Parkplatzbeleuchtung sowie weiterer Außenbeleuchtung.

Durch diese Trennung kann eine Unterscheidung nach Verbräuchen innerhalb und außerhalb der thermischen Hülle des Gebäudes erfolgen. Mit einem Gesamtverbrauch im Jahreszeitraum von 119 MWh/a (Mai 2014 bis April 2015) entfallen auf den Außenbereich 6 % des Gesamtstromverbrauches.

Divers

Der Teilbereich „Divers“ setzt sich zusammen aus sonstigen Technikanwendungen und Verbrauchern, die den anderen Teilbereichen nicht zugeordnet sind.

Dazu zählen

- Gastronomie (mit kompletter Koch- und Spülküche inklusive Kühl- und Tiefkühlraum und Bar inkl. Beleuchtung),
- Innensaunabereich (mit elektrischem Dampfbad, Infrarotkabinen, Kältebecken, und Eisbereiter etc.),
- der verpachtete separate Spabereich (inkl. Beleuchtung),
- Verwaltung (mit Büros und Teeküche) und
- Sonstiges (Kassen, Kassenautomaten, Haartrockner, elektroakustische Anlage, Server, GLT sowie diverse Steckdosen und Kleinverbraucher).

Der Stromverbrauch des Teilbereiches „Divers“ macht mit 489 MWh/a im Jahreszeitraum (Mai 2014 bis April) 2015 23 % des Gesamtstromverbrauches aus. Davon entfallen 88 MWh/a auf die Gastronomie, 69 MWh/a auf den Bereich der Innensauna, 11 MWh/a auf den Spabereich und 6 MWh/a auf die Verwaltung sowie 315 MWh/a auf „Sonstiges“.

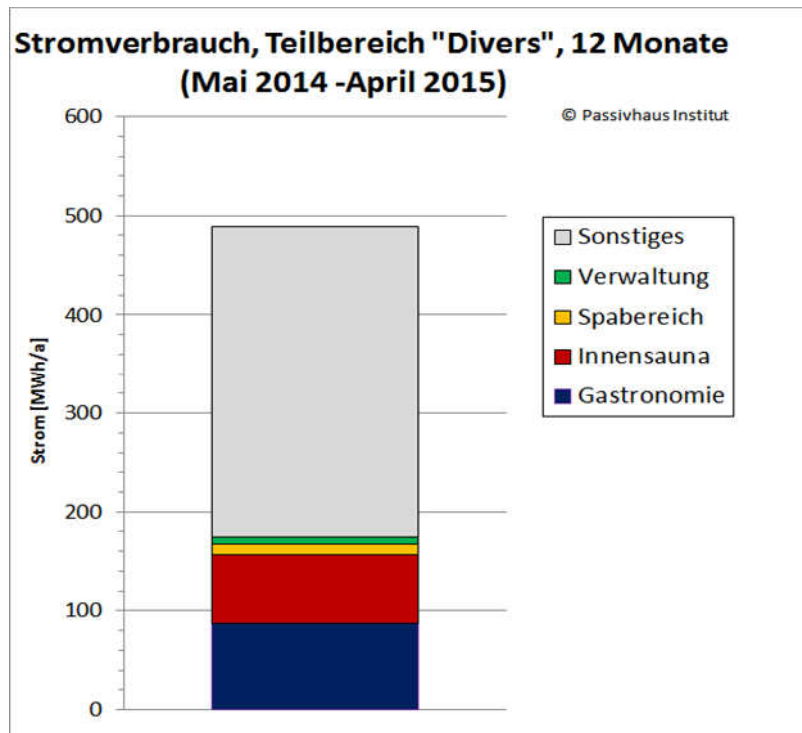


Abbildung 28: Stromverbrauch des Teilbereichs „Divers“ unterteilt in die einzelnen Verbraucher Gastronomie, Innensauna, separater Spabereich, Verwaltung und Sonstiges (Kassen, Kassenautomaten, Haartrockner, diverse Steckdosen und Kleinverbraucher) für den Jahreszeitraum von Mai 2014 bis April 2015.

5.3 Wasserverbrauch

Von den Stadtwerken Bamberg wurde der Wasserverbrauch mit dem alten Bamberger Schwimmbad verglichen: Trotz einer vierfach so großen Wasserfläche im Bambados ist der Wasserverbrauch gleich hoch. Dies liegt nicht nur an dem Einsatz wassersparenden Armaturen, sondern auch an der wassersparenden Kombination der Ultrafiltration mit einer Schlammwasseraufbereitungsanlage. Der jährliche Gesamtwasserverbrauch im Vergleich zu anderen Bädern ist in Kapitel 6.1 dargestellt.

In Abbildung 29 ist die Aufteilung des Wasserverbrauchs zu sehen. Der Wasserverbrauch für Duschen und zur Nachfüllung der Becken ist eindeutig dominierend, die Wasserverbräuche für die Saunabereiche dagegen geringer. Die Auswertung hat gezeigt, dass der Wasserverbrauch der Küche sehr gering ist, sodass er im Diagramm unter Sonstigem geführt wird. Der Wasserverbrauch für die Duschen wird in Kapitel 5.3 erläutert.

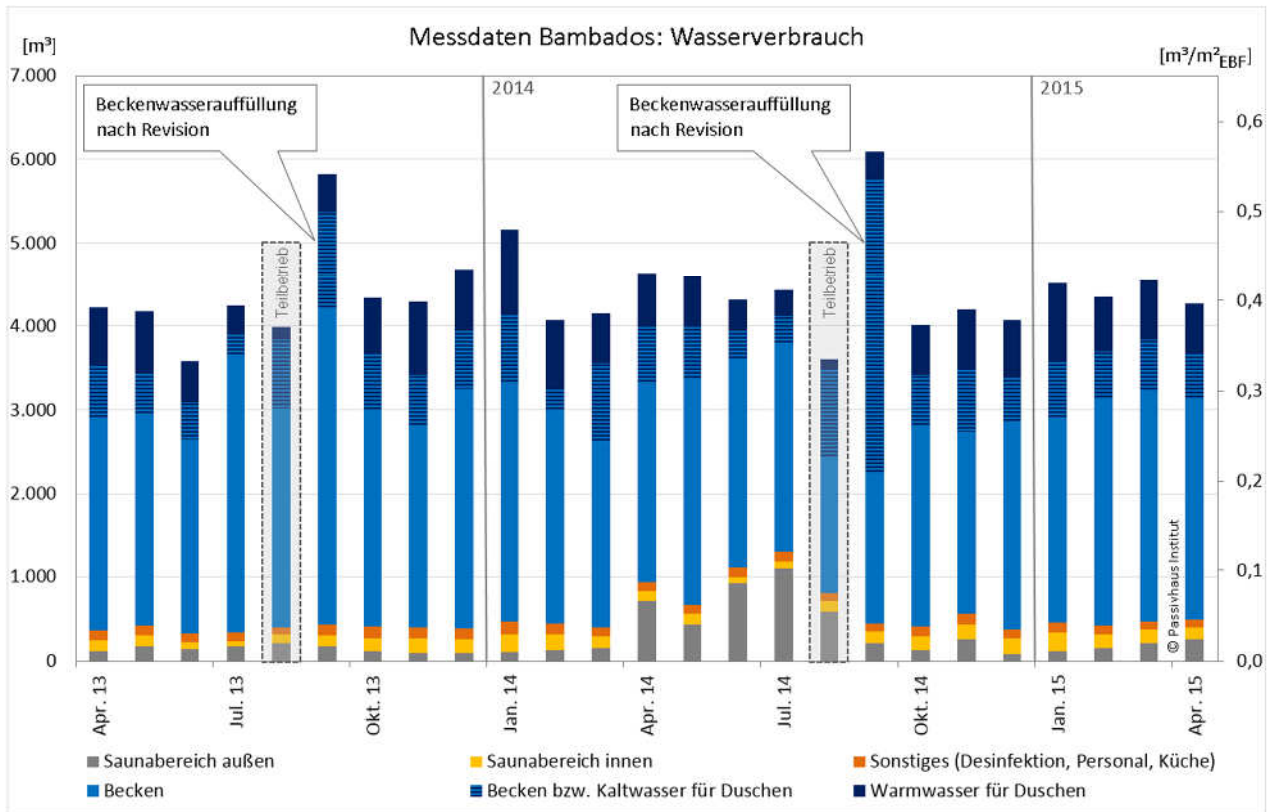


Abbildung 29: Monatlicher Wasserverbrauch (Wegen Sensordefekten kann der blaugestreifte Anteil nicht eindeutig dem Becken bzw. den Duschen zugeordnet werden)

5.4 Gebäudehülle

Eine Gebäudehülle in Passivhausqualität ist Grundvoraussetzung (siehe Kapitel 1.2) für das Passivhaus- Hallenbad. Der Betrieb des Bades zeigt die gute Dämmwirkung sowie die hohe Luftdichtheit als erstes durch den realisierten niedrigen Heizenergieverbrauch. Es wurde auch an den schwächsten Stellen der Gebäudehülle, den Fenstern, von den Betreibern im kalten Winter kein Kondensat festgestellt, obwohl bei dem Bad auf die sonst übliche Luftanströmung der Glasfassaden verzichtet wurde.

5.4.1 Luftdichtheit

Für energieeffiziente Gebäude ist eine ausreichend luftdichte Gebäudehülle die Voraussetzung für niedrige Energieverbräuche und die Funktion der Lüftungsanlage (Stichwort: „gerichtete Durchströmung“). Ein Hallenbad verfügt in großen Bereichen über deutlich höhere Raumlufttemperaturen und höhere Raumluftfeuchten. Daher ist eine nochmals erhöhte Anforderung an die Luftdichtheit notwendig, insbesondere aus Gründen des Bautenschutzes. Aus diesem Grund wurde der Anforderungswert für Passivhäuser mit $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ für das Bambados in der

Planungsphase auf $n_{50} = 0,2 \text{ h}^{-1}$ verschärft. Dies ist nicht nur aufgrund der Nutzung als Hallenbad, sondern auch schon aufgrund der Größe des Gebäudes notwendig.

Bei großen Gebäuden ist der q_{50} -Wert mit Bezug auf die Hüllfläche die sinnvollere Größe anstelle des üblichen n_{50} -Wertes mit Bezug auf das Raumvolumen. Der Grund ist das deutlich günstigere A/V-Verhältnis bei großen Gebäuden. Das gesamte Hallenbad Bambados inkl. Keller verfügt über ein Innenvolumen von 61.218 m^3 , eine Hüllfläche von 19.420 m^2 und somit über ein günstiges A/V-Verhältnis. Da die Größe q_{50} -Wert allerdings unüblicher ist, wurde der Anforderungswert doch als n_{50} -Wert formuliert.



Abbildung 30: Luftdichtheitsmessung: Die Ventilatoren wurden im Bereich der Eingangstüren eingebaut. Für die Messung der Luftdichtheit wurde trotz des großen Innenvolumens nur ein Ventilator benötigt

Um eine gute Luftdichtheit zu erreichen und die Messung reibungslos durchführen zu können, wurde einige Wochen vor dem Messtermin eine kurze Schulung für die ausführenden Firmen und die Bauleitung durchgeführt. Die Messung der Luftdichtheit wurde von Mitarbeitern des Passivhaus Instituts am 15. April 2011 durchgeführt. Bei einem so großen Gebäude den richtigen Zeitpunkt für die Messung zu finden, ist nicht einfach, wenn sinnvollerweise Nachbesserungen noch möglich sein sollen. Aus diesem Grund sind zum Teil temporäre Abdichtungen notwendig, wenn z.B. Außentüren noch fehlen. Konkret waren es Verglasungen der shedartigen Dachaufbauten, einzelne Türen und Verglasungen. Bei mehreren Durchführungen für Lüftungsleitungen und Kabel fehlten noch die Einbauten und wurden deshalb ebenfalls temporär mit Folien o.ä. abgeklebt.

Für die Messung wurden vier Ventilatoren in die Haupteingangstür montiert, um einen ausreichend großen Luftstrom fördern zu können. Zunächst wurde bei Unterdruckbedingungen von 50 Pa mit 11 Personen das Gebäude systematisch auf Leckagen abgesucht. Die folgenden kleineren Restleckagen wurden dabei gefunden:

- Pfosten-Riegel-System: regelmäßig kleinere Leckagen an Verbindungsstellen der Profile
- Unterer Abschluss Pfosten-Riegel-System zum Betonboden (systematisch)
- Glasleisten der Lochfenster im Verwaltungsbereich: kleine Leckagen

- UG: Anschluss Betonwand Keller an Betonbauwerk für Lüftungskanal
- Dachanschluss (Leichtbau) an Betonwand (Bereich Freizeitbecken)
- Pfosten-Riegel-Fassade an Betondecke (Bereich Sauna): Dichtband zum Teil faltig/abgelöst

Bei der eigentlichen Messung der Luftdichtheit wurde nur einer der vier Ventilatoren benötigt, da das Gebäude über eine hohe Luftdichtheit verfügt. Als Messwert ergab sich mit

$$n_{50} = 0,07 \text{ h}^{-1} \text{ entsprechend } q_{50} = 0,21 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$$

ein sehr gutes Ergebnis.

Dies entspricht einem Leakagevolumenstrom von nur 4.034 m³ bei 50 Pa. Um eine Vorstellung von der Größe der diversen kleinen verbleibenden Leckagen in der Gebäudehülle zu bekommen, kann die Summe dieser Leakageflächen vereinfacht berechnet werden. Im Bambados entspricht dies einer Fläche von etwa 45 cm x 45 cm. Das sind 0,001 % der Hüllfläche. Insgesamt wird damit deutlich, dass eine sehr gut luftdichte Gebäudehülle errichtet wurde.

BlowerDoor-Prüfbericht

Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A
Minneapolis BlowerDoor Modell 4, APT

Objekt : Hallenbad Bamberg Bambados 96050 Bamberg				Prüfer/in: Sören Peper Datum: 15.04.2011 FLIB-Nr.: 24400					
Klimadaten									
Innentemperatur: 12 °C		Luftgeschwin. Anemom.: 0,8 m/s		Referenzdruckmessstellen: 1					
Außentemperatur: 12 °C		Windstärke: 2		Gebäudestandort: B					
Luftdruck (Standard): 101325 Pa				Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 2 %					
Unterdruck				Überdruck					
Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}	Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
	0,5 Pa	-0,3 Pa	1,0 Pa	-1,2 Pa		0,5 Pa	-1,1 Pa	0,4 Pa	-0,2 Pa
Messreihen									
Reduzier- blende	Gebäude- druckdiff.	Gebläse- druckdiff.	Volumen- strom V_v	Abwei- chung	Reduzier- blende	Gebäude- druckdiff.	Gebläse- druckdiff.	Volumen- strom V_v	Abwei- chung
O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	0,0	—	—	—	Δp_{01}	-0,6	—	—	—
A	-21	68	2202	0,22	A	40	228	4024	10,97
O	-65	46	4618	1,01	A	36	151	3276	-2,24
O	-54	36	4063	0,62	A	22	79	2374	-0,04
O	-41	23	3295	-2,83	A	17	52	1939	-1,81
O	-25	14	2532	1,04	O	86	83	6190	0,66
					O	75	66	5539	-1,26
					O	62	50	4790	-2,86
					O	45	31	3810	-2,71
Δp_{02}	-0,6	—	—	—	Δp_{02}	0,3	—	—	—
Korrelationskoeff. r:				0,999	Korrelationskoeff. r:				0,994
Vertrauensintervall (95%)					Vertrauensintervall (95%)				
C_{env}	[m³/(h Pa²)]	327	max. 408	min. 262	C_{env}	[m³/(h Pa²)]	273	max. 364	min. 205
C_L	[m³/(h Pa²)]	330	max. 412	min. 264	C_L	[m³/(h Pa²)]	275	max. 368	min. 206
n	[-]	0,63	max. 0,69	min. 0,57	n	[-]	0,70	max. 0,77	min. 0,62
Ergebnis, Kenngrößen									
V =				61218 m³	A _F =		A _E = 19420 m²		
	V ₅₀	Unsicher- heit %	n ₅₀	Unsicher- heit %	w ₅₀	Unsicher- heit %	q ₅₀	Unsicher- heit %	
	m³/h		h ⁻¹		m³/m²h		m³/m²h		
Unterdruck	3872	+/- 7 %	0,06	+/- 8 %			0,20	+/- 8 %	
Überdruck	4196	+/- 7 %	0,07	+/- 8 %			0,22	+/- 8 %	
Mittelwert	4034	+/- 7 %	0,07	+/- 8 %			0,21	+/- 8 %	
Anforderungen nach: Passivhaus Inst.									
0,2 1/h *** ***									

Die Anforderungen der Vorschrift werden erfüllt.

Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Abbildung 31: Protokollblatt der Luftdichtheitsmessung vom 15. April 2011

5.4.2 Thermographische Untersuchung

Zur Überprüfung der Bauausführung und Bauqualität der hochwertig wärmegeämmten Gebäudehülle des Bades wurde am 17. Januar 2013 durch Mitarbeiter des PHI eine Infrarotthermographie-Untersuchung von außen und innen durchgeführt. Es sollte überprüft werden, ob es Abweichungen von der geplanten Qualität oder sonstige Auffälligkeiten gibt.

Um den störenden Einfluss der Solarstrahlung während der Untersuchung zu vermeiden und auch den Einfluss der Strahlung vom Vortag zu minimieren, wurde die Untersuchung in den frühen Morgenstunden ab 4:45 Uhr begonnen und um ca. 8:15 Uhr beendet. Danach erfolgte die Innenuntersuchung. Die Wetterbedingungen waren mit Außentemperaturen um $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einem Vortag mit nur geringer Solarstrahlung sehr gut, um kontrastreiche Aufnahmen erstellen zu können. Zur Kalibrierung und Kontrolle der Kamera wurden Pt100-Oberflächensensoren auf eine Verglasung und die benachbarte Wandoberfläche fixiert und mit Kreppband überklebt. Mit dem Kreppband wird der Emissionskoeffizient der üblichen Baumaterialien angeglichen. Glas und blankes Metall verfügen über deutlich abweichende Emissionskoeffizienten gegenüber den sonst bauüblichen Materialien (Putzoberfläche, bemalte Oberflächen).

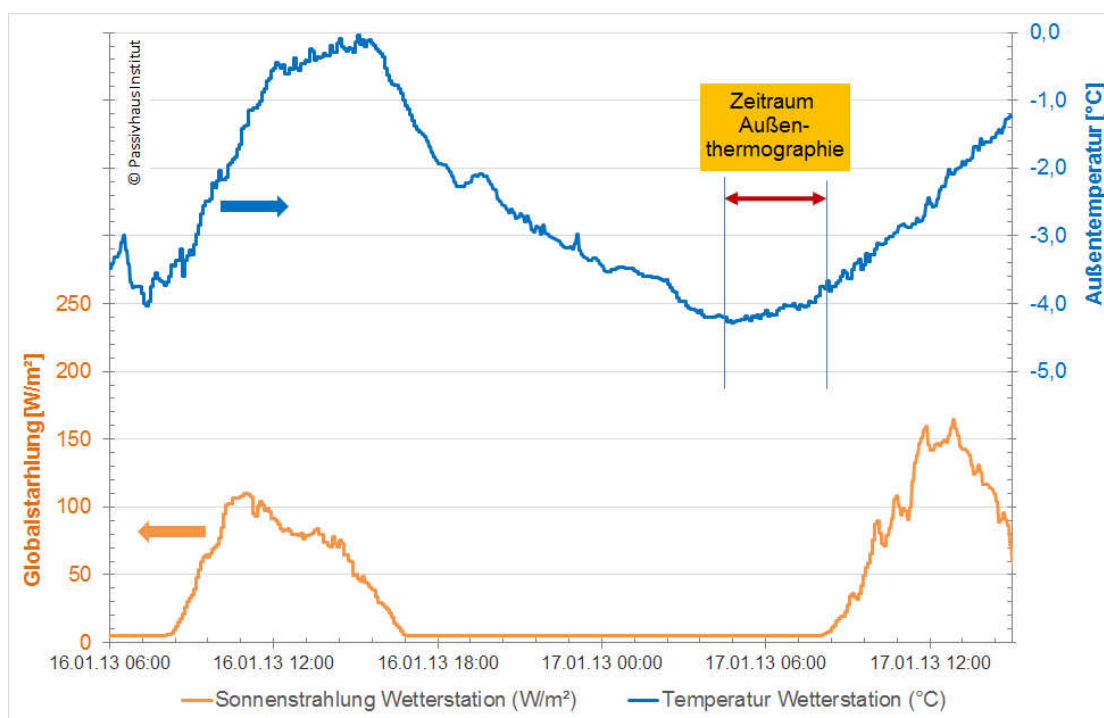


Abbildung 32: Wetterbedingungen im Zeitbereich der Thermographischen Untersuchung des Hallenbades am 17. Januar 2013

Tabelle 6: Randbedingungen der thermographischen Untersuchung

Außentemperatur Vortag (16.01.2013; Mittelwert)	- 2.0 °C
Außentemperatur 17.01.2013 (Mittelwert 4:45 bis 8:15 h)	- 4.1 °C
Windbedingungen	schwacher Wind
Niederschlag	kein Niederschlag
rel. Luftfeuchte (Mittelwert 5:30 bis 8:00 Uhr)	95,3 %

Die thermographischen Aufnahmen wurden mit dem hochauflösenden Thermographiesystem „VARIOSCAN high resolution“ der Firma Jenoptik (Jena) erstellt. Zur Auswertung der Aufnahmen wurde das Programm IRBIS+ V2.2 der Firma InfraTec GmbH (Dresden) verwendet.

Tabelle 7: Geräteparameter des verwendeten Thermographiesystems

Geräteparameter des Thermographiesystems	
Messgerät	VARIOSCAN 3021 ST, Fa. Jenoptik
Spektralbereich	8 bis 12 µm
Aufnahmesystem	Scansystem
Detektormaterial	HgCdTe
Temperaturauflösung bei 30°C	± 0,03 K
Bildformat	360 x 240 Pixel

Bei der Außenthermographie wurde das gesamte Gebäude von außen untersucht: Außenwände, Fenster, Türen, Anschlüsse sowie der Dachbereich. Dazu wurden über 250 Thermogramme angefertigt. Die Temperaturskala der dargestellten Bilder ist für jeweils zusammengehörige Aufnahmen immer gleich skaliert, um eine direkte Vergleichbarkeit herzustellen. Jedem Bild ist eine Farb-Temperaturskala als Legende beigelegt. Nach Möglichkeit wird dem Thermogramm das entsprechende Tageslicht-Foto aus ähnlicher Perspektive gegenübergestellt. Diese Fotos wurden erst zu einem späteren Zeitpunkt am gleichen Tag aufgenommen (Tageslicht).

Aufgrund der überwiegenden Außenwandkonstruktion mit hinterlüfteten, vorgehängten Fassadenplatten geben deren Oberflächentemperaturen nur indirekt Auskunft über die thermische Qualität der Wand. Sollten Schwachstellen vorhanden sein, würden Warmluftfahnen oder ähnliche Effekte allerdings an den Stoßfugen und/oder am Dachanschluss sichtbar werden.



Abbildung 33: Thermogramm und Lichtbild der Außenfassade vom Eingangs- sowie Verwaltungsbereich

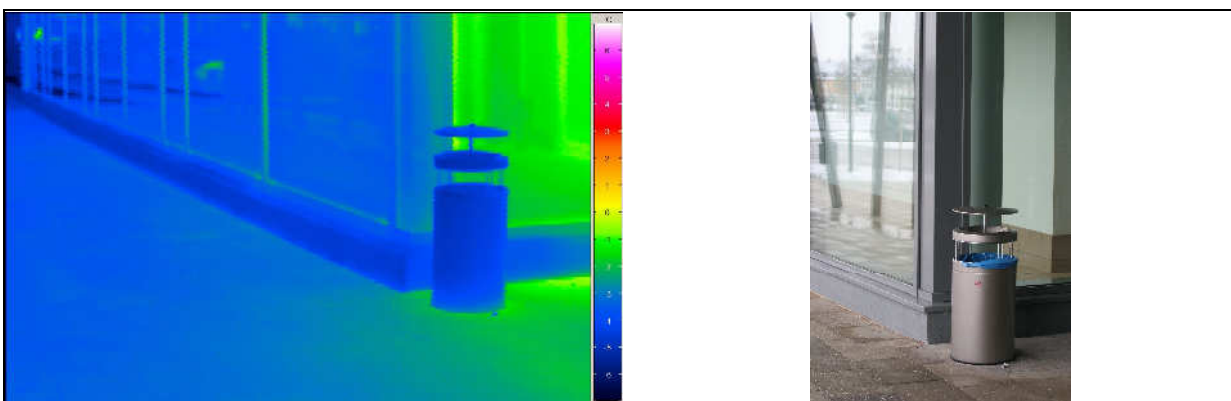


Abbildung 34: Eingangsbereich und Fassade zum Parkplatz (Pfosten-Riegel)

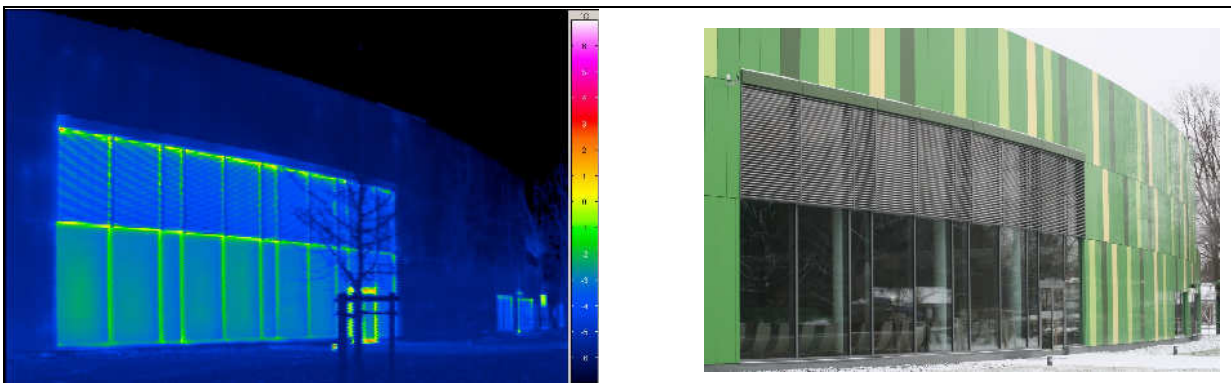


Abbildung 35: Fassade im Bereich Freizeitbecken

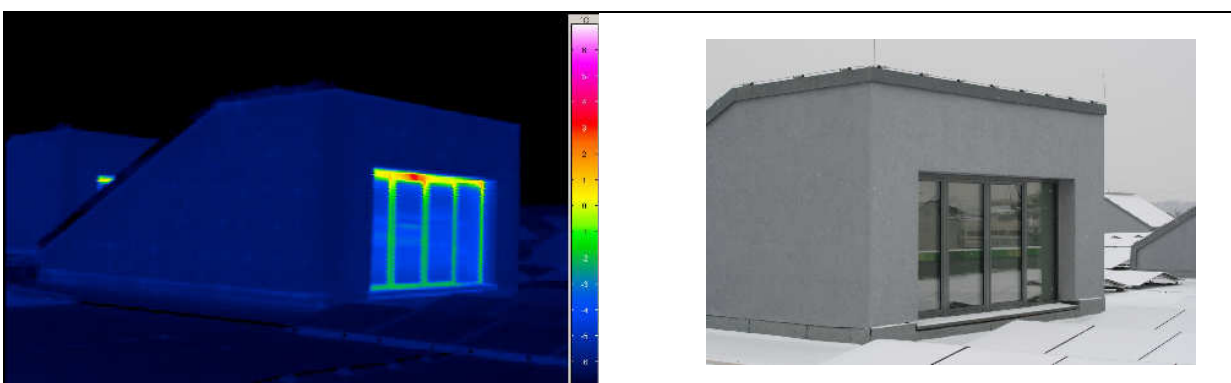


Abbildung 36: Shedartiger Dachaufbau (Oberflächentemperatur Wärmedämmverbundsystem: -5,7°C)

Die Darstellungen in Abbildung 33 bis Abbildung 36 zeigen eindrücklich die hohe Qualität der Gebäudehülle: Die Außenoberfläche ist gleichmäßig 'kalt', d.h. die Oberflächentemperaturen sind wie erwartet gleichmäßig niedrig. Lediglich die Fenster mit ihren höheren U-Werten sind wärmer. Im Bereich der Überdachung des Eingangs sind höhere Temperaturen vorhanden, da das Dach zu einer Abschirmung („Verschattung“) des kalten Nachthimmels führt. Dies lässt die Oberflächentemperaturen in dem geschützten Bereich weniger stark abkühlen. Nur am Fenster im Dach-Shed ist eine punktuell erhöhte Temperatur festzustellen, welche auf eine Schwachstelle hinweist.

Im Folgenden werden einige Auffälligkeiten („hot spots“) gezeigt. Es muss jedoch betont werden, dass die Gebäudehülle insgesamt eine sehr hohe Qualität aufweist. Im Anlieferbereich im UG sind in Richtung Parkplatz/Heizzentrale bzw. zum Sauna-Außengelände Betonwände vorhanden. Der Übergang an die gedämmte Gebäudefassade musste gegen drückendes Wasser ausgeführt werden. Die Dämmung verfügt daher in dem Bereich über eine Schwächung. Diese Bereiche sind im Wärmebild (Abbildung 37) deutlich erkennbar, insbesondere im jeweils unteren Bereich. Es werden maximale Oberflächentemperaturen von +6,7 bzw. +3,4 °C festgestellt. Die gedämmte Wand (WDVS) zeigt dagegen mit Temperaturen von -4,5 °C eine hohe Dämmqualität.

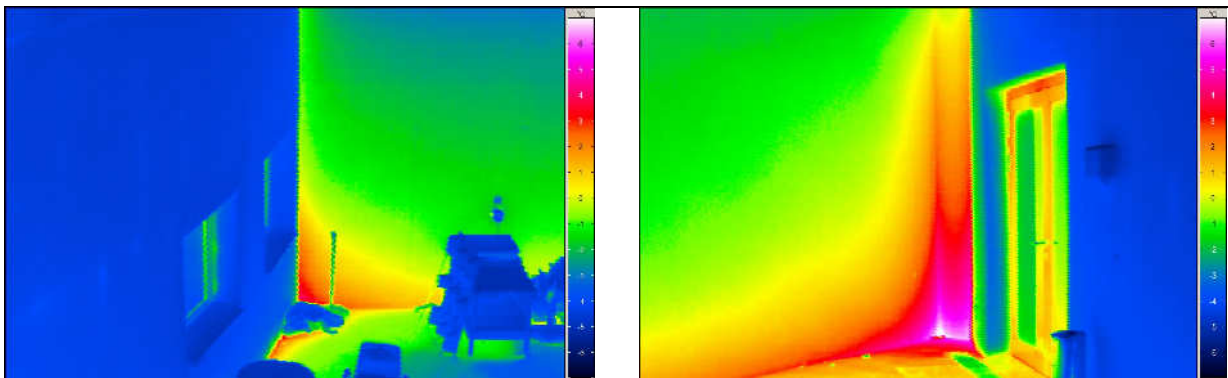


Abbildung 37: Beide Anschlüsse der Betonwände an die gedämmte Gebäudehülle im Bereich der Anlieferung im UG

Mit maximal +11,4 °C auf dem Türrahmen des Lehrbereiches (Abbildung 38) zeigt sich, dass es an dieser Tür eine Schwachstelle gibt. Vermutlich schließt die Tür nicht ausreichend dicht. Betrachtet man die gleiche Tür von innen (Innenthermographie Abbildung 39) zeigt sich deutlich die niedrigere Oberflächentemperatur am Rahmen gegenüber der Pfosten-Riegel-Konstruktion. Minimal werden an der Schwelle und am unteren Rahmen +13,7 °C gemessen. Aufgrund der Anforderungen einer Notausgangstür konnte nicht die benötigte thermische Qualität realisiert werden. Bisher ist allerdings laut Betreiber kein Kondensat aufgetreten. Auch die anderen Außentüren dieser Bauart (Sportbecken, zweites Lehrschwimmbecken) zeigen ebenfalls die niedrigen Oberflächentemperaturen, was die thermischen Optimierungspotentiale aufzeigt. Der Markt von thermisch hochwertigen Fenster-Aluprofilen hat sich seit dem Bau des Bades weiterentwickelt und es ist davon auszugehen, dass für zukünftige Projekte noch hochwertigere Produkte zur Verfügung stehen.

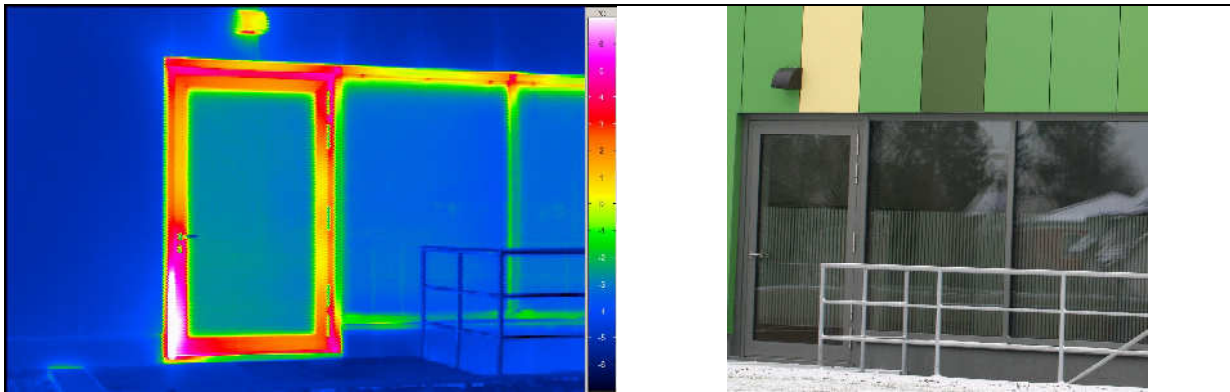


Abbildung 38: Außentür und Pfosten-Riegel System sowie Kellerabgang im Bereich des Lehrschwimmbekens

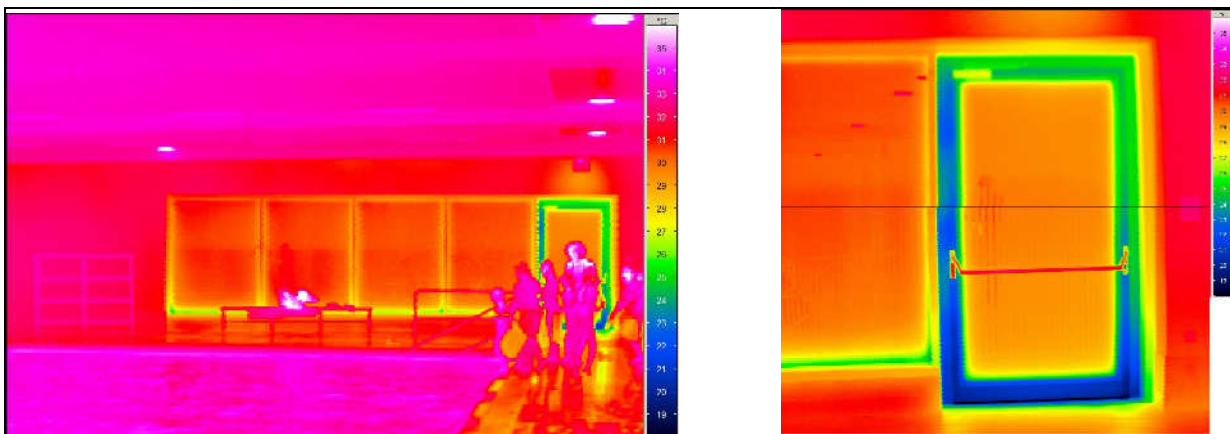


Abbildung 39: Innenthermographie des Bereichs der Tür und der Pfosten-Riegel-Fassade im Bereich des Lehrbeckens sowie Detailbild der Außentür

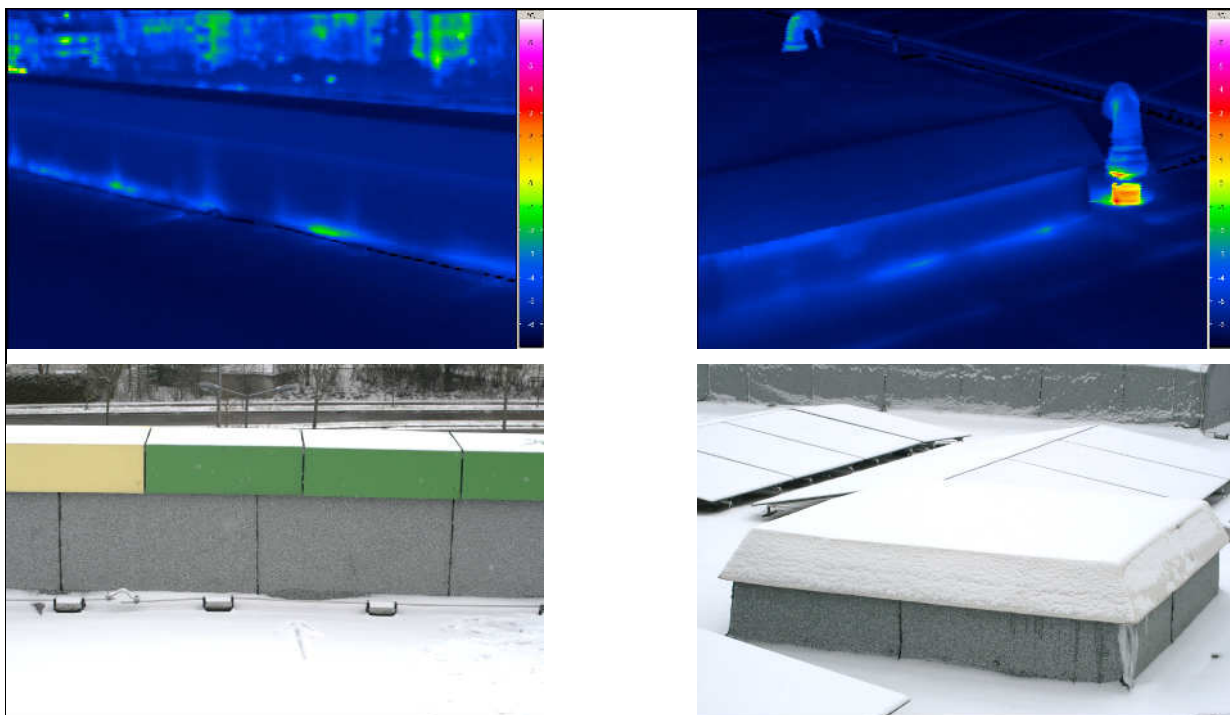


Abbildung 40: Kleinere Auffälligkeiten im Dachbereich (Attika und RWA)

Die Untersuchung des Dachbereichs zeigt harmonische niedrige Oberflächentemperaturen in der Fläche, womit die erfolgreiche Realisierung der hochwertigen Dämmung belegt wird. Punktuell gibt es einige kleinere Schwachstellen an Kabeldurchführungen, einem Höhenversprung (zum Spa-/Saunabereich), den RWA-Klappen sowie wiederholt am Übergang zur Attika. Bei diesen Punkten scheint es sich um konstruktionsbedingte, geringe Schwächungen der Dämmung zu handeln.

Der Übergang vom Gebäude zum Außenbecken im 1. OG erfolgt durch eine Pufferzone mit Kunststoff-Einhausung. Aus thermischen Gründen wurde auf ein durchgehendes Innen-Außen-Becken zum direkten hinausschwimmen verzichtet. Bei der Thermographie ist der Bereich natürlich auffällig, da die offene Wasserfläche sowie die Kunststoff-Einhausung erwartungsgemäß hohe Temperaturen zeigen.

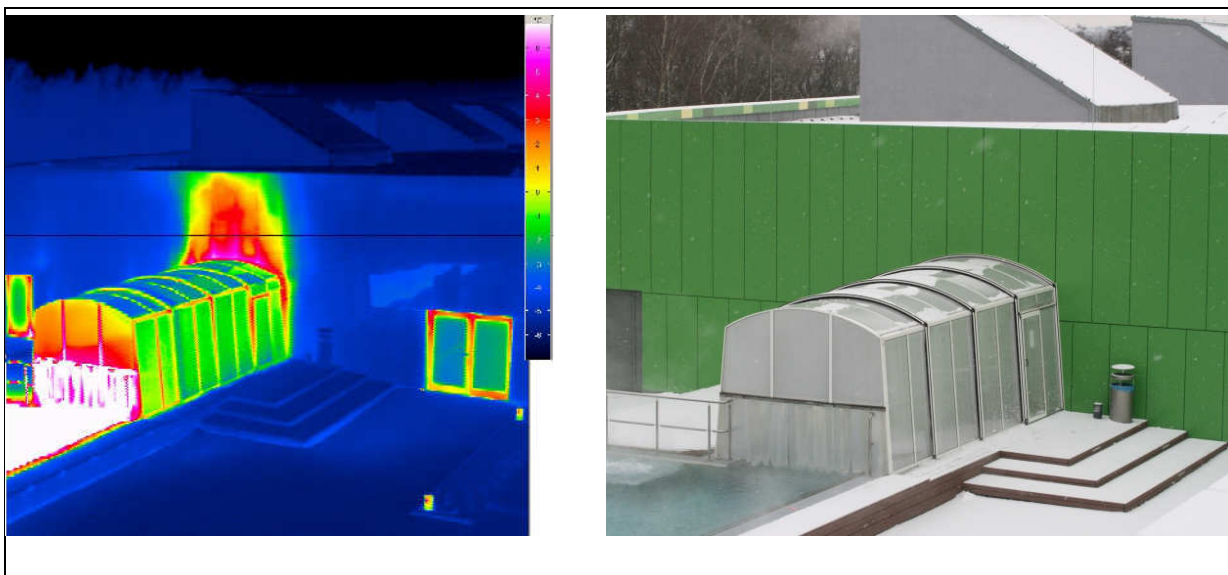


Abbildung 41: Übergang zum Außenbecken (Bereich gehört nicht zur thermischen Gebäudehülle)

Nach der Außenuntersuchung wurden innerhalb des gesamten Gebäudes inkl. Keller 165 Thermogramme aufgenommen. Auch diese zeigen eindrucksvoll die hohe Qualität der Gebäudedämmung durch gleichmäßige innere Oberflächentemperaturen der Außenwände. Im Bereich der Außenfassade in der Freizeithalle (Abbildung 42) zeigen sich hohe Temperaturen der Außenwände von ca. 30 bis 31 °C. Als Bereich mit der niedrigsten Temperatur fällt wieder eine Außentür auf.

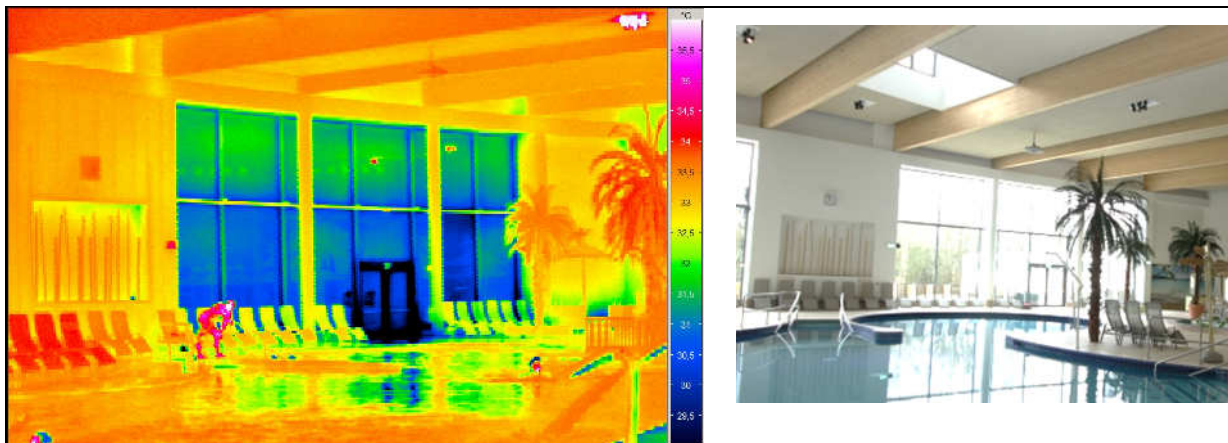


Abbildung 42: Freizeitthalle mit Blick zur Außenfassade

Exemplarisch wird einer der shedartigen Dachaufbauten in der Freizeitthalle untersucht. Auch hier zeigen sich harmonische Oberflächentemperaturen der Wandflächen (Abbildung 43). Die Rahmen der Fenster zeigen (aus dieser ungünstigen Perspektive) mit Temperaturen deutlich über 25 °C eine ausreichende Qualität, um Kondensatfreiheit bei den vorherrschenden Luftbedingungen zu gewährleisten.

Der Bereich oberhalb der abgehängten Decken in den Hallen stellt lüftungstechnisch einen „Totraum“ dar, da hier keine aktive Durchströmung erfolgt. Aus diesem Grund sind in diesen Bereichen auch vereinzelt Sensoren zur Überprüfung der Luftbedingungen (Temperatur und Feuchte) montiert. Die Thermographie zeigt in dem Bereich erwartungsgemäß etwas niedrigere Oberflächentemperaturen. In Abbildung 44 dargestellt ist die im optisch zugänglichen Bereich gemessene unkritische Minimaltemperatur um 27,7 °C.



Abbildung 43: Blick in ein Dach-Shed mit Verglasung. Das Lichtbild zeigt den Dachaufbau (Shed) mit einem Gitterrost zur Wartung; das Thermogramm ein anderes Shed ohne Gitterroste.

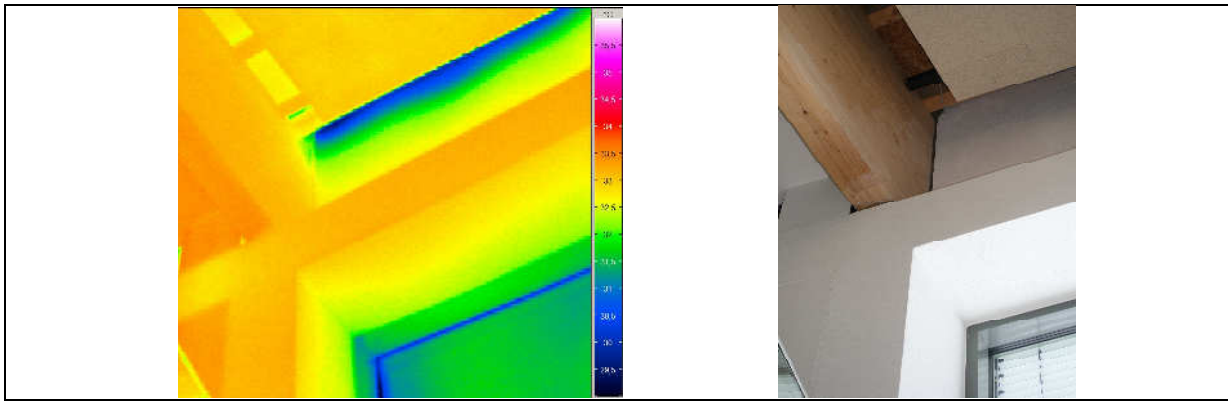


Abbildung 44: Bereich der abgehängten Decke / Außenwand in der Freizeithalle

Im Sportbereich kann die Wandqualität gut geprüft werden, da Außenwand und Innenwand direkt ineinander übergehen. Abbildung 45 zeigt einen Teil der Süd-Ost-Wand der Sporthalle. Nur im oberen linken Bereich grenzt die Wand an die Außenluft (Bereich des Außenbeckens im 1. OG), unten und rechts grenzen andere Hallenbereiche (Bereich Lehrschwimmbecken und Freizeithalle) an. Deutlich sichtbar bei der gewählten Einstellung des Thermographiebildes ist der Unterschied der Oberflächentemperatur in den unterschiedlichen Bereichen. Was so markant ins Auge fällt, ist tatsächlich nur ein Unterschied von 0,8 K. Daran zeigt sich die hohe Qualität der Außenwanddämmung.

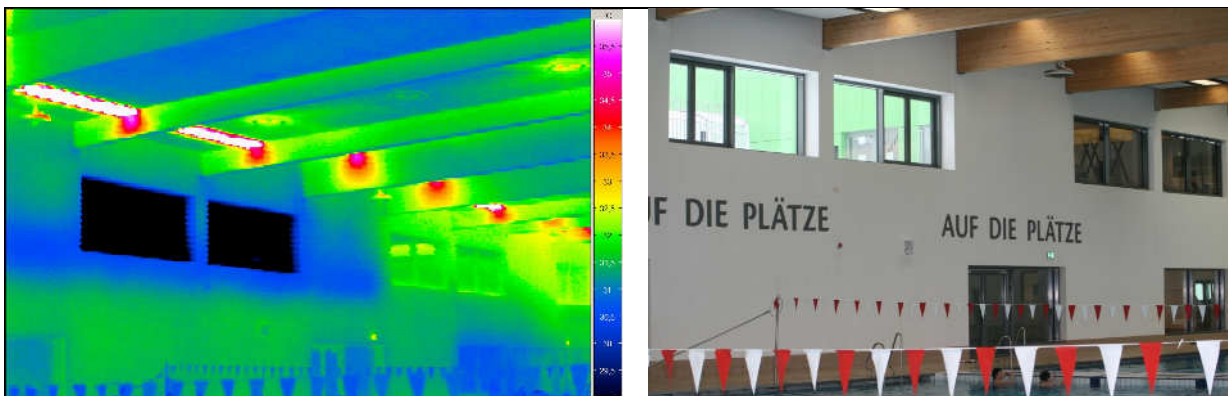


Abbildung 45: Süd-Ost-Wand im Sportbereich. Im oberen Bereich grenzt die Wand an die Außenluft, im unteren Bereich die Lehrschwimmhalle an. Der Temperaturunterschied der Oberfläche beträgt nur etwa 0,8 Kelvin.

Im Keller des Gebäudes wurden keine größeren Auffälligkeiten festgestellt. An diversen Armaturen wären vorgefertigte Dämmschalen sinnvoll, dort gibt es z.T. wie oft leider üblich keine Dämmung. An Rohrleitungen sowie den Oberflächen der Lüftungsgeräte wäre eine noch weitere Verbesserung der thermischen Qualität wünschenswert. Auffällig ist der Einfluss eines gekippten Fensters im Keller (Abbildung 46). Es werden Oberflächentemperaturen bis minimal 7 °C festgestellt, sogar der Kellerbodenbereich vor dem Fenster ist ausgekühlt. Trotz der hohen Raumlufttemperaturen kann daher nur empfohlen werden, die Fenster im Keller dauerhaft geschlossen zu halten.

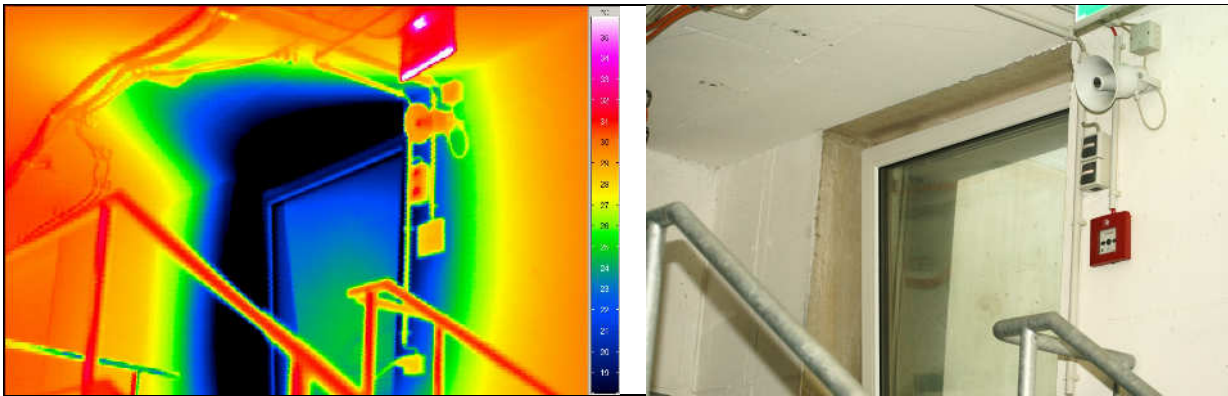


Abbildung 46: Kellerfenster (gekippt) im Bereich vor den Rutschenanlagen

5.5 Wetterdaten/Außenbedingungen

Die für die Auswertung relevanten Wetterdaten werden in ihren Verläufen nachfolgend dargestellt. Gewählt für die Darstellung wurden tagesmittlere und monatsmittlere Werte sowie Monatssummen für den gesamten Messzeitraum (März 2013 bis April 2015).

Die Monatssummen der Globalstrahlung (Abbildung 48) zeigen, dass die Jahre 2013 und 2014 (März bis Dezember) über ähnliche Gesamtsummen verfügen. Auch die mittleren Außentemperaturen (Abbildung 49) zeigen überwiegend vergleichbare Jahresverläufe. Nur der Winter 2013/2014 fällt deutlich milder aus als die gemessenen Wintermonate des Vorjahres sowie des nachfolgenden Jahres.

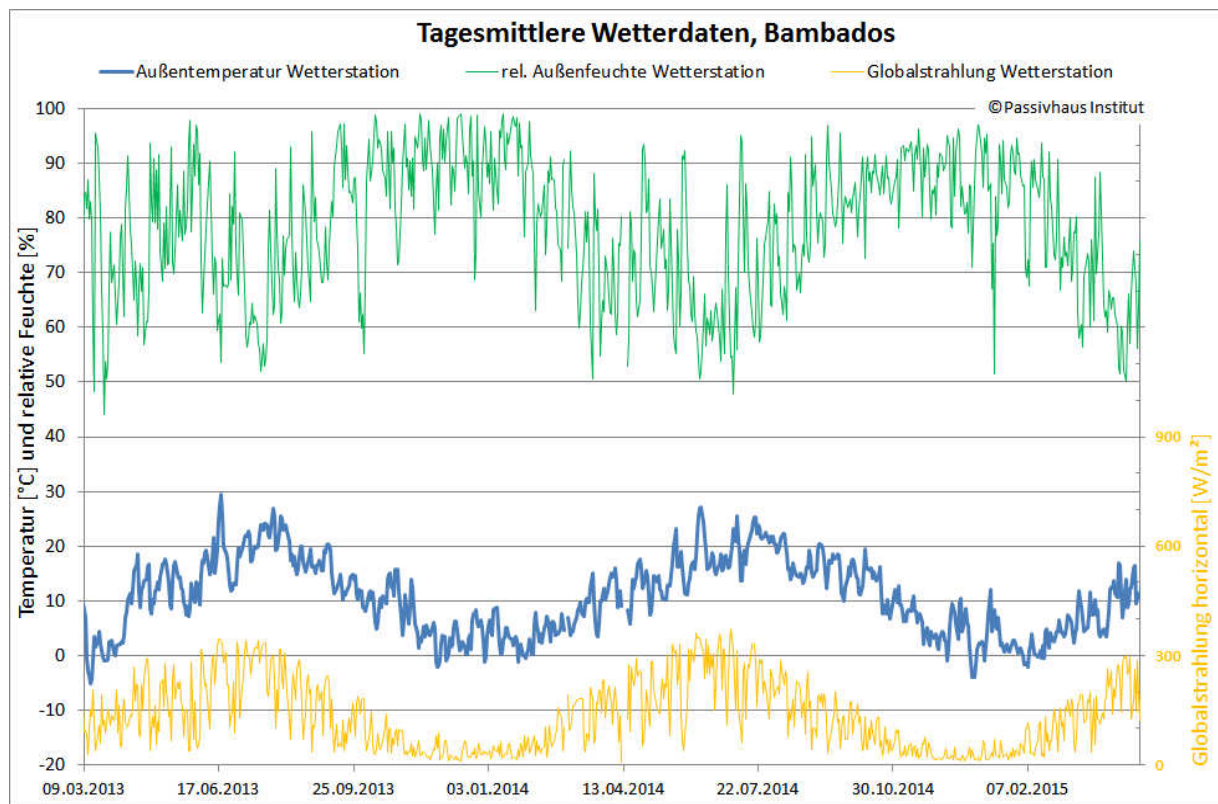


Abbildung 47: Gemessene tagesmittlere Außentemperaturen, relative Feuchten und horizontale Globalstrahlung für den gesamten Messzeitraum (März 2013 bis April 2015)

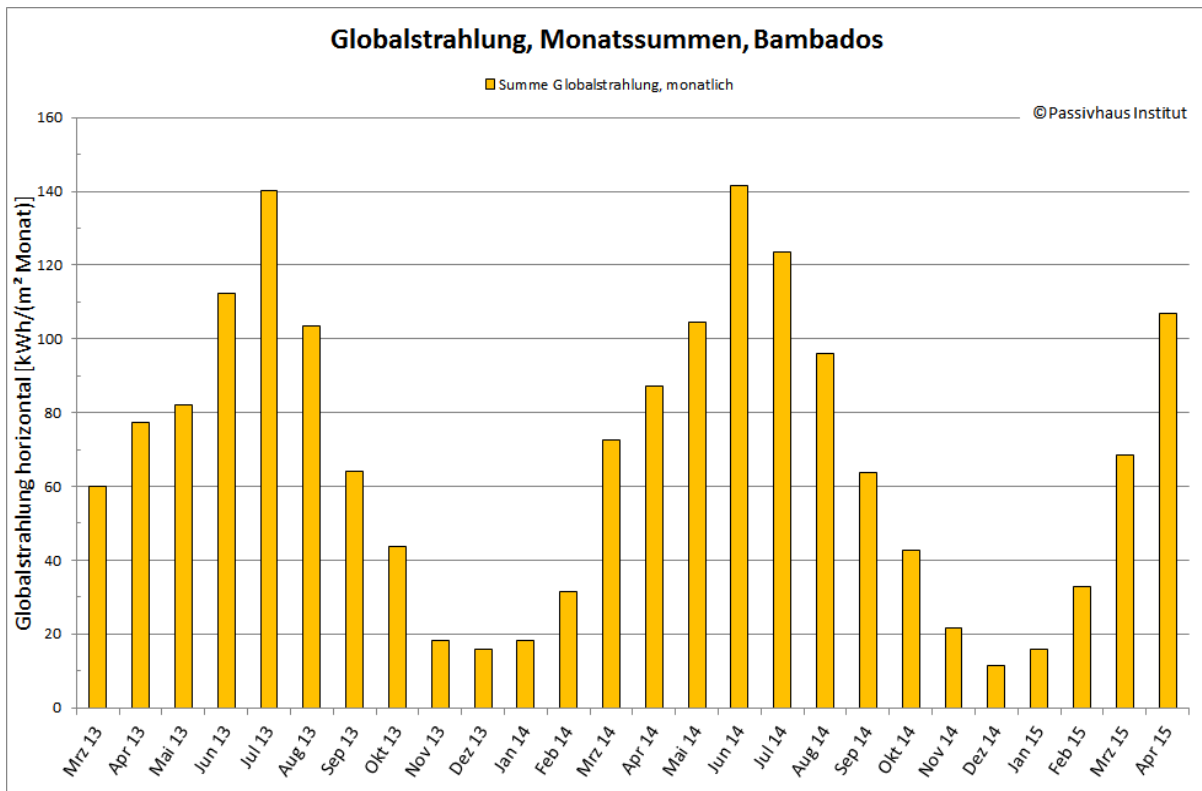


Abbildung 48: Gemessene Monatssummen der horizontalen Globalstrahlung für den gesamten Messzeitraum (März 2013 bis April 2015)

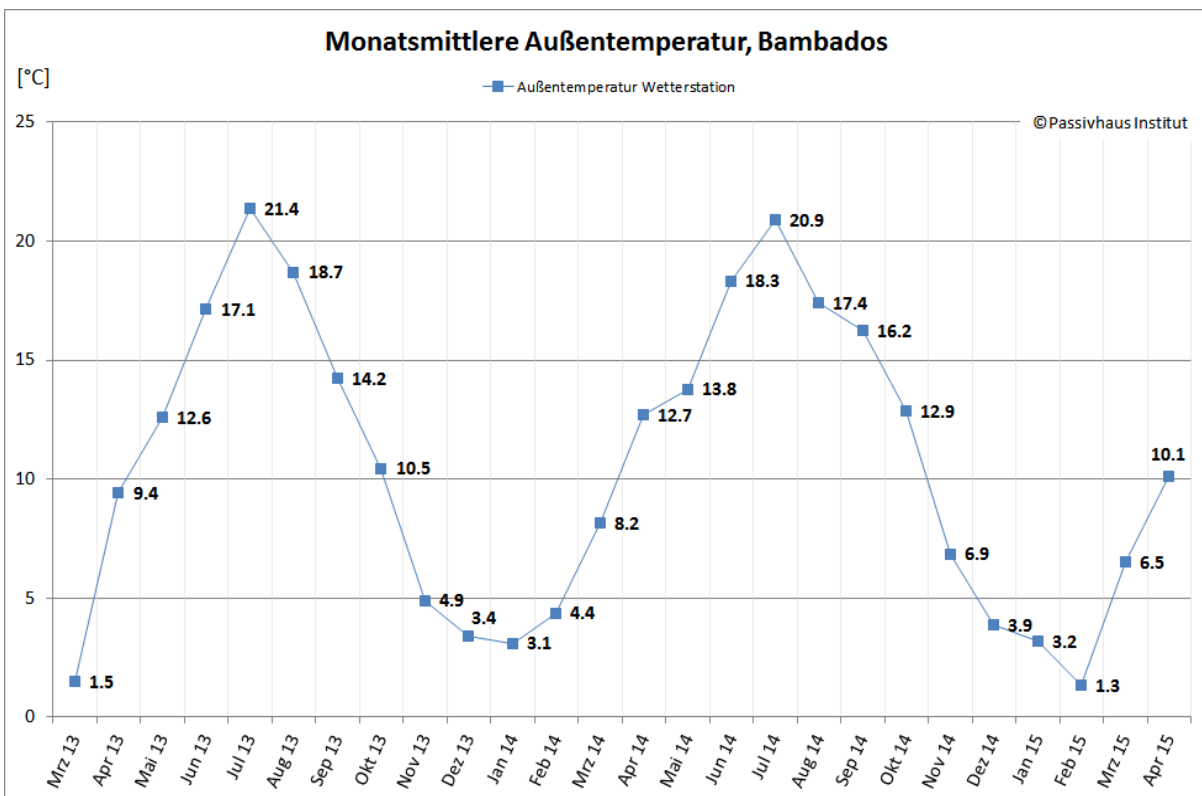


Abbildung 49: Gemessene Monatsmittelwerte der Außentemperatur für den gesamten Messzeitraum (März 2013 bis April 2015)

5.6 Raumluftbedingungen Schwimmhallen

Die Auswertung der Luftbedingungen der Innenräume erfolgt größtenteils mithilfe von kalibrierten Messdaten (siehe Kapitel 3.1.2), die in Stundenmittelwerte umgerechnet wurden. Zunächst wurden Effekte durch direkte solare Einstrahlung auf alle relevanten Messstellen in den Innenräumen untersucht und ausgeschlossen. Einen Überblick über die Verläufe von Temperaturen, relativen und absoluten Feuchten in den Schwimmhallen während des gesamten Messzeitraums (März 2013 bis April 2015) geben die folgenden Abschnitte. Zeiträume, in denen eine Revision stattfand, die mit einem Teilbetrieb des Bades einhergeht, sind stets gekennzeichnet und werden nicht zu Auswertungszwecken verwendet.

Von Betreiberseite aus sind die Sollwerte für die relativen Luftfeuchten in allen Hallenbereichen tagsüber auf 58 % in der Abluft festgelegt. Außerhalb der Öffnungszeiten werden die Sollwerte der relativen Luftfeuchten in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur erhöht. Die Solltemperaturen erfuhren im Laufe der Zeit einige Anpassungen, die teilweise deutlich im Gesamtverlauf ersichtlich sind. Im Abschnitt „Referenzbedingungen“ wird diskutiert, welche Sensoren für die Angabe der repräsentativen Lufttemperaturen und -feuchten ausgewählt wurden.

Grundrisspläne mit den eingezeichneten Positionen der Messstellen finden sich im Anhang.

5.6.1 Überblick Sportbereich

In Abbildung 50 ist der Verlauf der relevanten Lufttemperaturen im Sportbereich über den gesamten Messzeitraum dargestellt. Im Sportbereich sind neben den Sensoren in der Abluft der beiden Lüftungsgeräte fünf Wandsensoren vorhanden, die hier betrachtet werden. Diese befinden sich in Höhen von 1,5, 4, 6, und 10 m an verschiedenen Positionen (siehe Grundrisse im Anhang). Es lässt sich wie zu erwarten durchgängig eine Temperaturschichtung (je höher desto wärmer) feststellen. Ab Februar 2014 lässt sich an der geschmäleren Bandbreite der Ablufttemperaturen eine Optimierung in der Lüftungsregelung erkennen (Details hierzu siehe Kapitel 5.7 „Lüftung Halle“). Es wird weniger Außenluft eingebracht, was vor allem nachts die Hallentemperaturen nicht mehr so stark erniedrigt. Insgesamt zeigt sich ab diesem Zeitpunkt ungeachtet einzelner Ausreißer ein gleichmäßiges Temperaturband von ± 1 bis maximal $\pm 1,5$ K.

Deutlich zu erkennen ist ein ungewollter Temperaturanstieg auf teilweise bis über 38 °C im Sommer 2014 (ca. einen Monat vor der Revision), der durch einen technischen Defekt bedingt war. Eine Woche zuvor wurde der Sollwert der Hallentemperatur testweise von 30 °C auf 28 °C herabgesetzt. Dieser wurde nach der Revision (September 2014) wieder auf 30 °C angehoben.

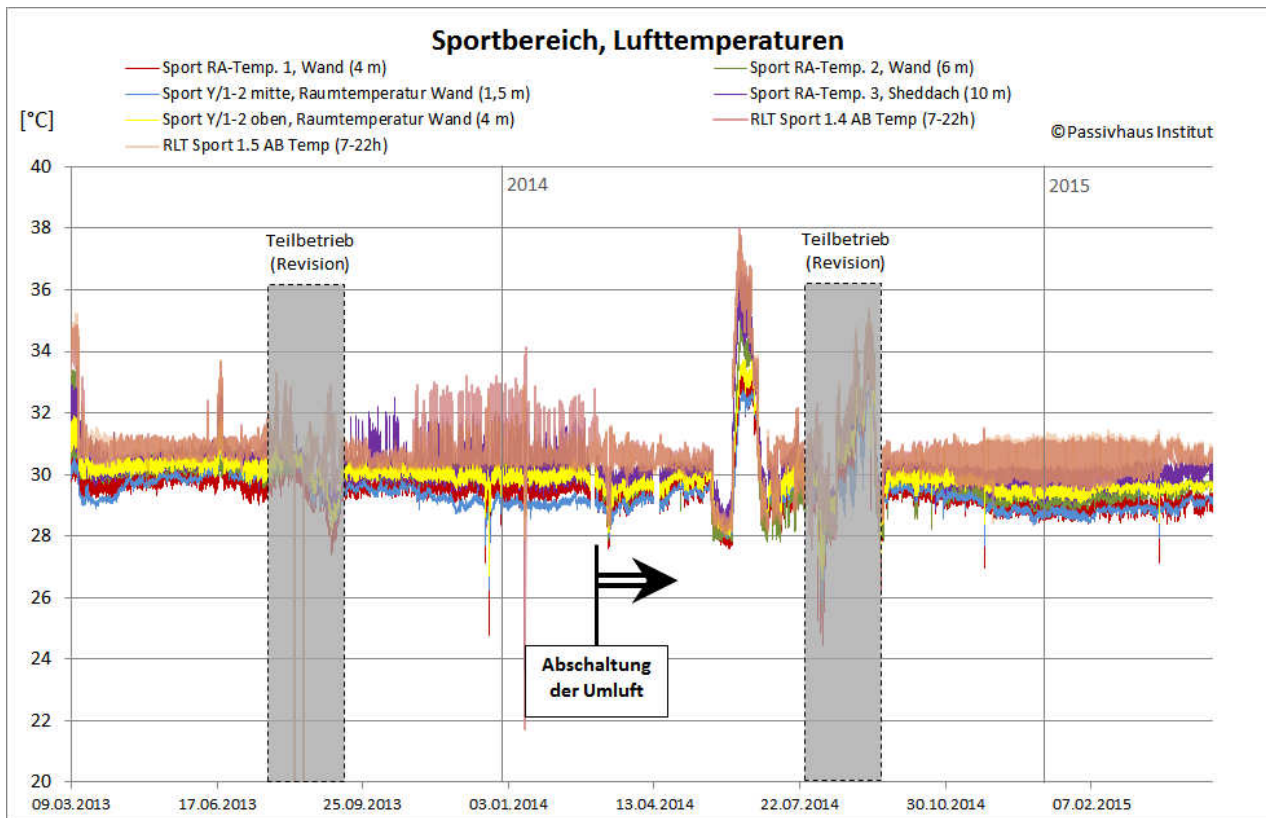


Abbildung 50: Verlauf der Lufttemperaturen im Sportbereich: Dargestellt sind Messdaten von Wandsensoren in verschiedenen Höhen und von Abluftsensoren in beiden Lüftungsgeräten im gesamten Messzeitraum.

Deutlich sichtbar in der Gesamtdarstellung (Abbildung 51) ist ein breites Band der relativen Feuchten aller Sensoren, was u. A. durch den Tag-Nacht-Wechsel bedingt ist. Es ist zu beachten, dass die Abluftsensoren bei Stillstand der Lüftungsgeräte keine für die Halle relevanten Werte liefern (siehe auch Abbildung 57), weshalb im Diagramm die Messwerte der Abluftsensoren nur zwischen 7 und 22 Uhr dargestellt werden. Mit dem endgültigen Abschalten der Umluft ab Februar 2014 werden niedrige relative Luftfeuchten bis auf einzelne Ausreißer oder Fehler in der Regelung nicht mehr festgestellt. Da an manchen höheren Positionen im Sporthallenbereich durch die Lüftungsanordnung keine optimale Durchmischung stattfindet, steigen dort teilweise die Luftfeuchten an. Ab 30.10.2014 ist auffällig, dass die Luftfeuchte in den größeren Höhen deutlich erhöht ist. Dies ist vermutlich bedingt durch den vergleichsweise niedrigeren Luftwechsel in diesem Zeitabschnitt (siehe dazu auch Abbildung 73).

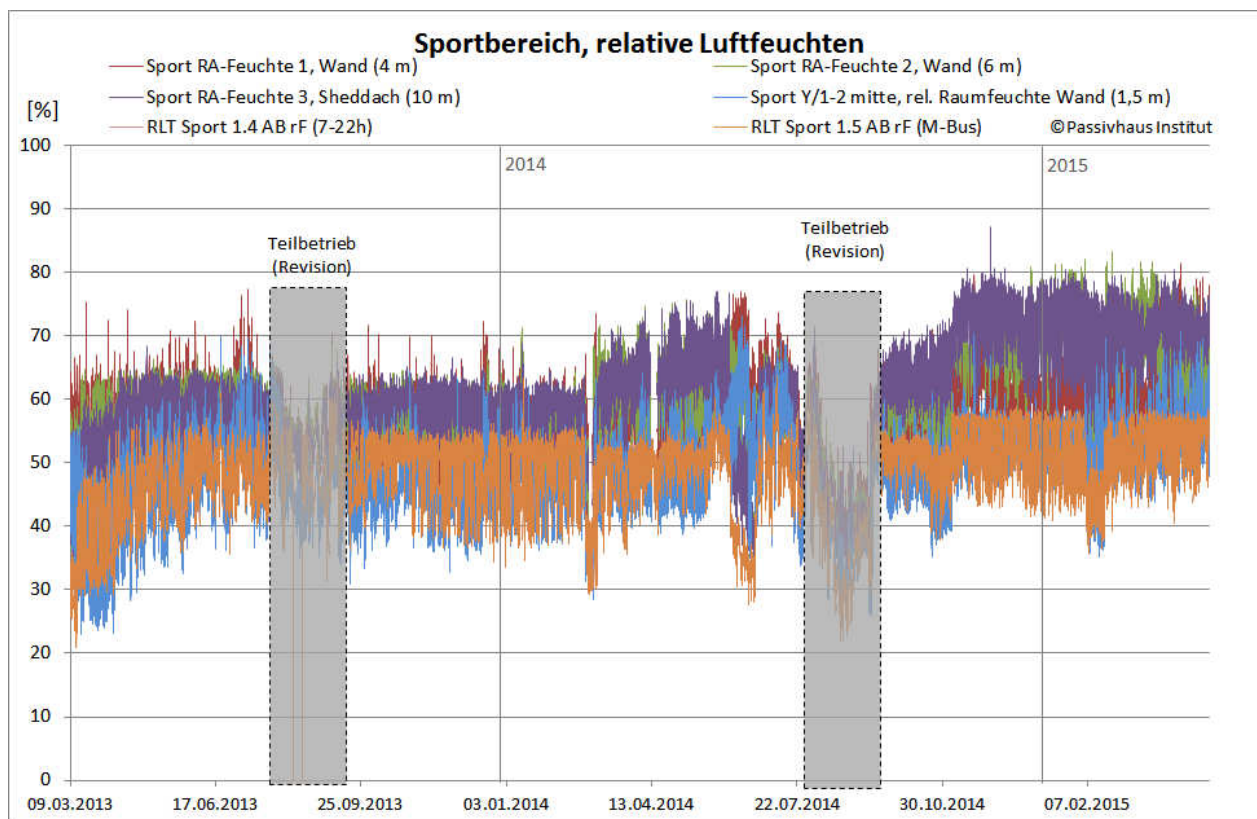


Abbildung 51: Verlauf der relativen Luftfeuchten im Sportbereich: Dargestellt sind Messdaten von Wandsensoren in verschiedenen Höhen und von Abluftsensoren in beiden Lüftungsgeräten im gesamten Messzeitraum.

In Abbildung 52 sind ergänzend die Luftfeuchtwerte aus der vorherigen Darstellung als absolute Werte dargestellt. Nach der Revision im Sommer 2014 und diversen Optimierungen der Lüftungsregelung verlaufen die relativen Luftfeuchten der Abluft der Lüftungsgeräte in einem Band von $\pm 8\%$. Ab diesem Zeitpunkt werden erhöhte Luftfeuchten in höheren Positionen im Sportbereich festgestellt. Zur Einordnung kann der Wert des Oberflächenkriteriums von 23 g/kg nach [Schulz 2009] herangezogen werden. Dieser stellt die Grenze zur Tauwasserfreiheit damals marktverfügbarer Pfosten-Riegel-Konstruktionen dar. Eine Feuchte von über 23 g/kg wird während des normalen Betriebes nicht erreicht. Der Wert wurde lediglich kurzzeitig während des technischen Defekts in der Heizungsregelung im Sommer 2014 (ca. einen Monat vor der Revision) überschritten.

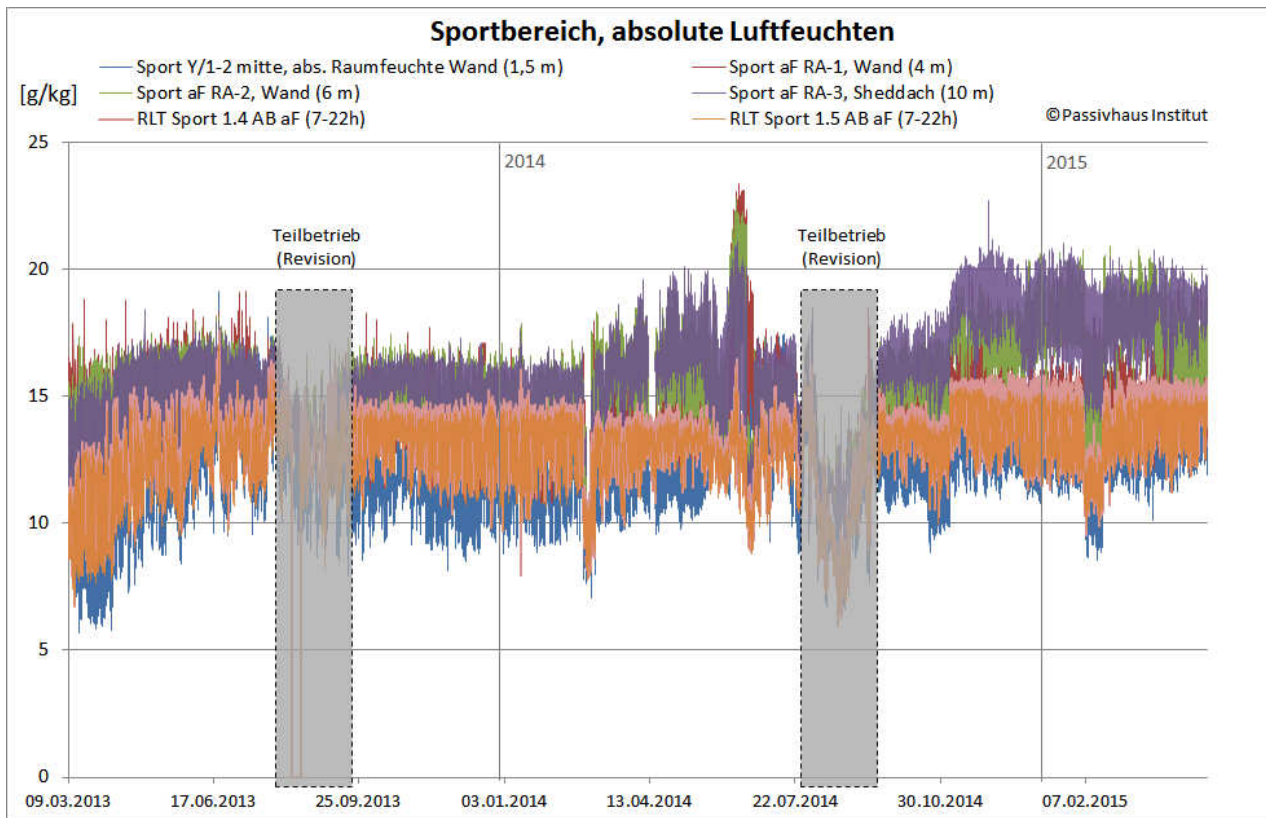


Abbildung 52: Verlauf der absoluten Luftfeuchten im Sportbereich: Dargestellt sind Messdaten von Wandsensoren in verschiedenen Höhen und von Ablftsensoren in beiden Lüftungsgeräten im gesamten Messzeitraum.

5.6.2 Überblick Freizeitbereich

Auch im Freizeitbereich befinden sich neben den Ablftsensoren in den Lüftungsgeräten Wandsensoren in Höhen von 1,5, 4, 6 und 10 m an verschiedenen Positionen (siehe Grundrisse im Anhang). Es fanden im Messzeitraum mehrere Änderungen des Lufttemperatursollwertes statt. So wurde dieser zuletzt auf Wunsch der Badegäste auf 34 °C angehoben (erkennbar in Abbildung 53). Die Wandsensoren der Messstellen MN/7 liegen unterhalb eines Treppenaufganges bzw. innerhalb eines Versprungs und zudem in der Nähe von Wasser-Attraktionen und nahe an der Tür zum Sportbereich, deren Messwerte sind demnach nur zur groben Orientierung geeignet, aber nicht repräsentativ für die Raumbedingungen. Insgesamt zeigt sich ein Temperaturband von $\pm 1,5$ K bis maximal ± 2 K um den jeweiligen Sollwert. Es ist zu beachten, dass die Ablftsensoren bei Stillstand der Lüftungsgeräte keine für die Halle relevanten Werte liefern (siehe auch Abbildung 57), weshalb die Messwerte der Ablftsensoren entsprechend der Öffnungszeiten nur zwischen 8 und 22 Uhr dargestellt sind.

Untypischerweise wurde der Freizeitbereich mit einer nahezu konstanten Beckenwassertemperatur von durchschnittlich 32 °C während des gesamten Messzeitraums bei Lufttemperatur-Sollwerten von 30 bis 32 °C mit einer meist höheren Beckenwasser- als Lufttemperatur betrieben. Ab dem 30.11.2014 wurde dieser Zustand umgekehrt - mit einer Sollwert-Änderung der Raumtemperatur auf 34 °C bei gleichbleibenden Beckenwassertemperaturen. Dies hat zur Folge, dass sich die Luftschichtung mit einem breiteren Temperaturband anders einstellt als im davorliegenden Zeitraum.

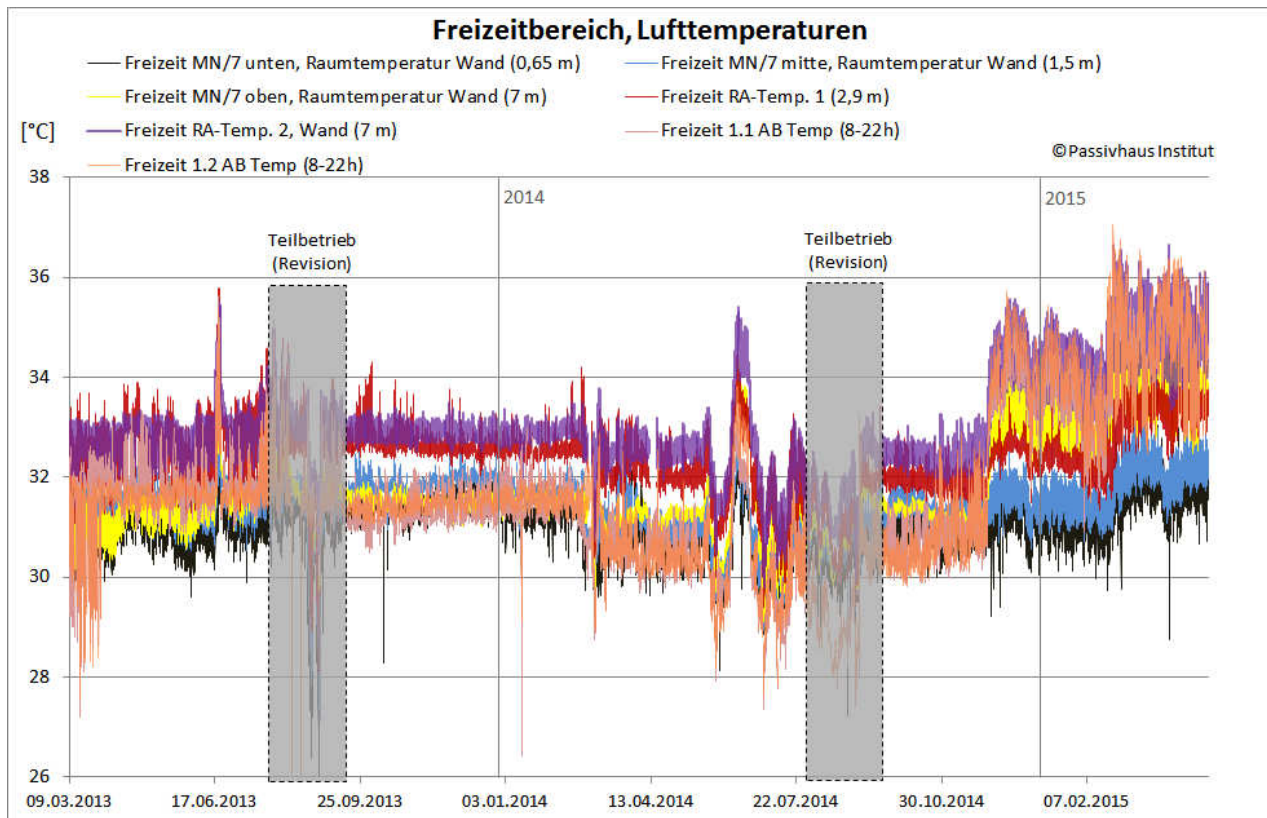


Abbildung 53: Verlauf der Lufttemperaturen im Freizeitbereich: Dargestellt sind Messdaten von Wandsensoren in verschiedenen Höhen und von Abluftsensoren in beiden Lüftungsgeräten im gesamten Messzeitraum.

Auch an den Feuchtwerten (siehe Abbildung 54 und Abbildung 55) lässt sich ab dem 30.11.2014 die vorausgehend beschriebene Änderung der Luftschichtung erkennen. An der Messstelle MN/7 in 1,5 m Höhe werden damit höhere Feuchten als in höheren Lagen (Abluftansaugung und Messstelle in 7 m Höhe) festgestellt.

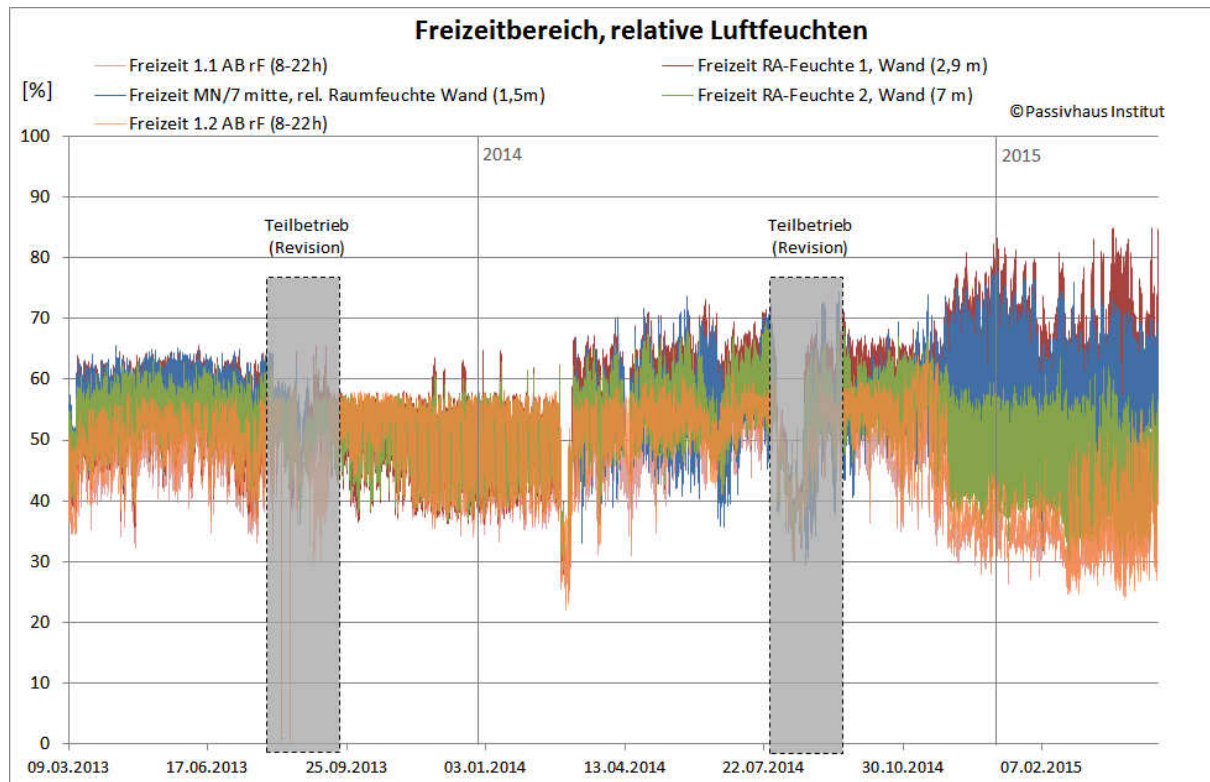


Abbildung 54: Verlauf der relativen Luftfeuchten im Freizeitbereich: Dargestellt sind Messdaten von Wandsensoren in verschiedenen Höhen und von Abluftsensoren in beiden Lüftungsgeräten im gesamten Messzeitraum.

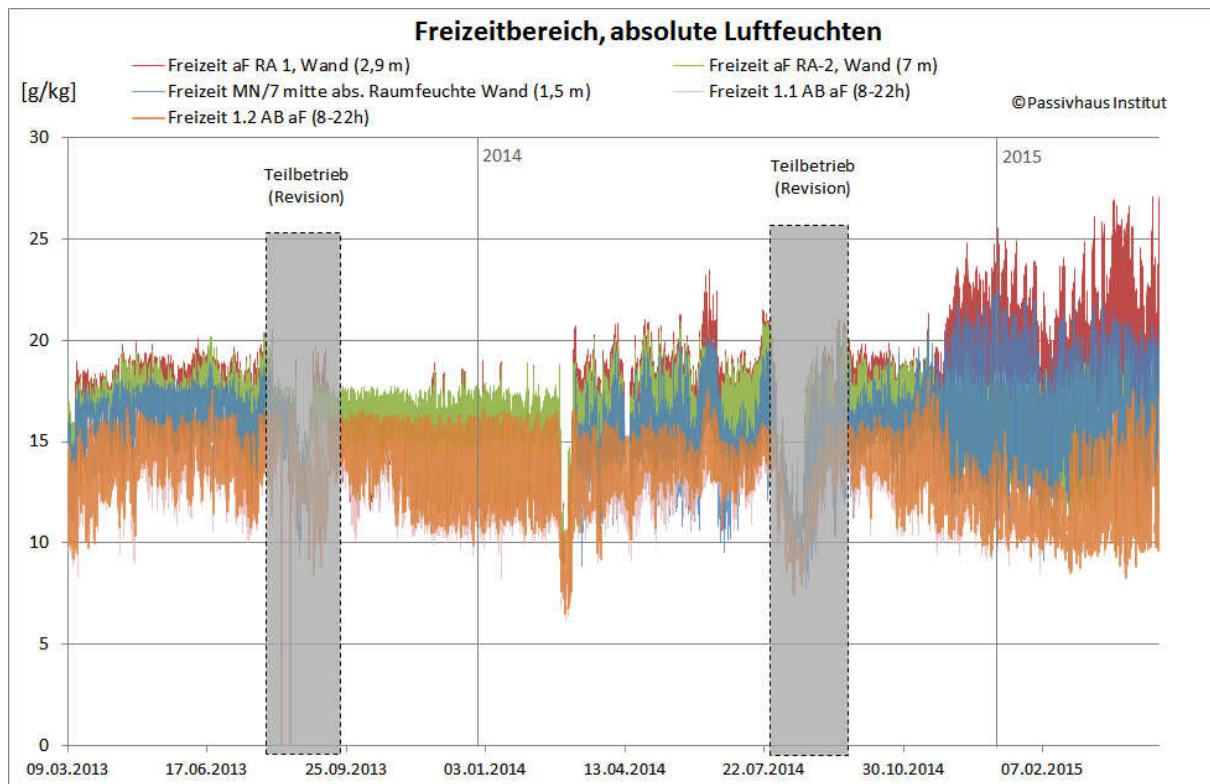


Abbildung 55: Verlauf der absoluten Luftfeuchten im Freizeitbereich: Dargestellt sind Messdaten von Wandsensoren in verschiedenen Höhen und von Abluftsensoren in beiden Lüftungsgeräten im gesamten Messzeitraum.

5.6.3 Überblick Lehrbereich

Der Lehrbereich besteht aus zwei Hallen mit jeweils einem Schwimmbecken. Jede Halle verfügt über einen Wandsensor in 1,5 m Höhe (Lehrbecken 1: TU/11 und Lehrbecken 2: XY/7, siehe Grundriss im Anhang). Die Luftversorgung erfolgt für beide Teile über ein gemeinsames Lüftungsgerät. Es wurden über den gesamten Messzeitraum verschiedene Solltemperaturen realisiert, die wie Abbildung 56 zeigt, durch die gemessenen Lufttemperaturen bis auf einzelne Ausreißer mit einem Band von $\pm 1,5$ K eingehalten werden. Da das Lüftungsgerät nachts teilweise abgeschaltet ist, sind die Messwerte des Abluftensors für Aussagen über die Hallenbedingungen in dieser Zeit nicht relevant. Exemplarisch ist dies in Abbildung 57 dargestellt. Aufgrund dessen, werden zur Darstellung und Auswertung nur Abluftwerte zwischen 8 und 22 Uhr verwendet.

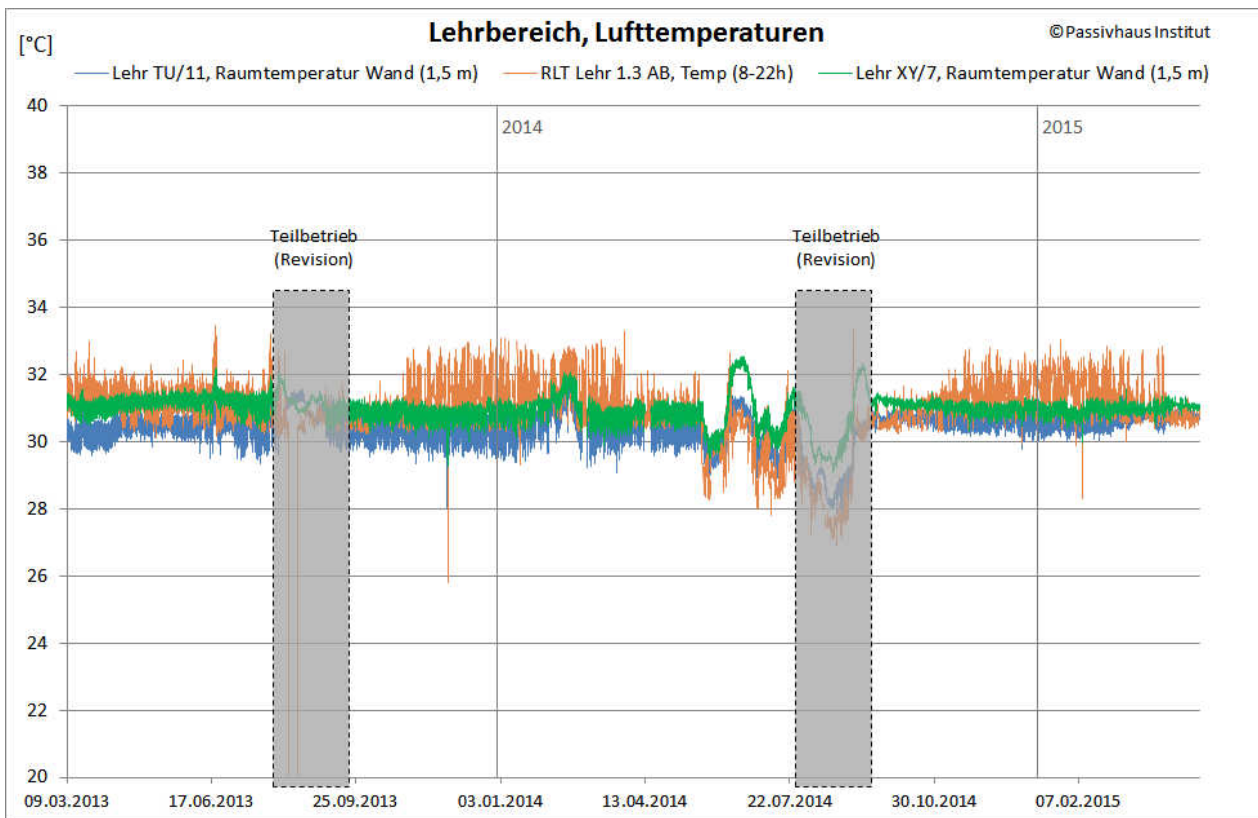


Abbildung 56: Verlauf der Lufttemperaturen im Lehrbereich: Dargestellt sind Messdaten der Wandsensoren bei Lehrbecken 1 & 2 und des Abluftensors innerhalb des Lüftungsgerätes im gesamten Messzeitraum.

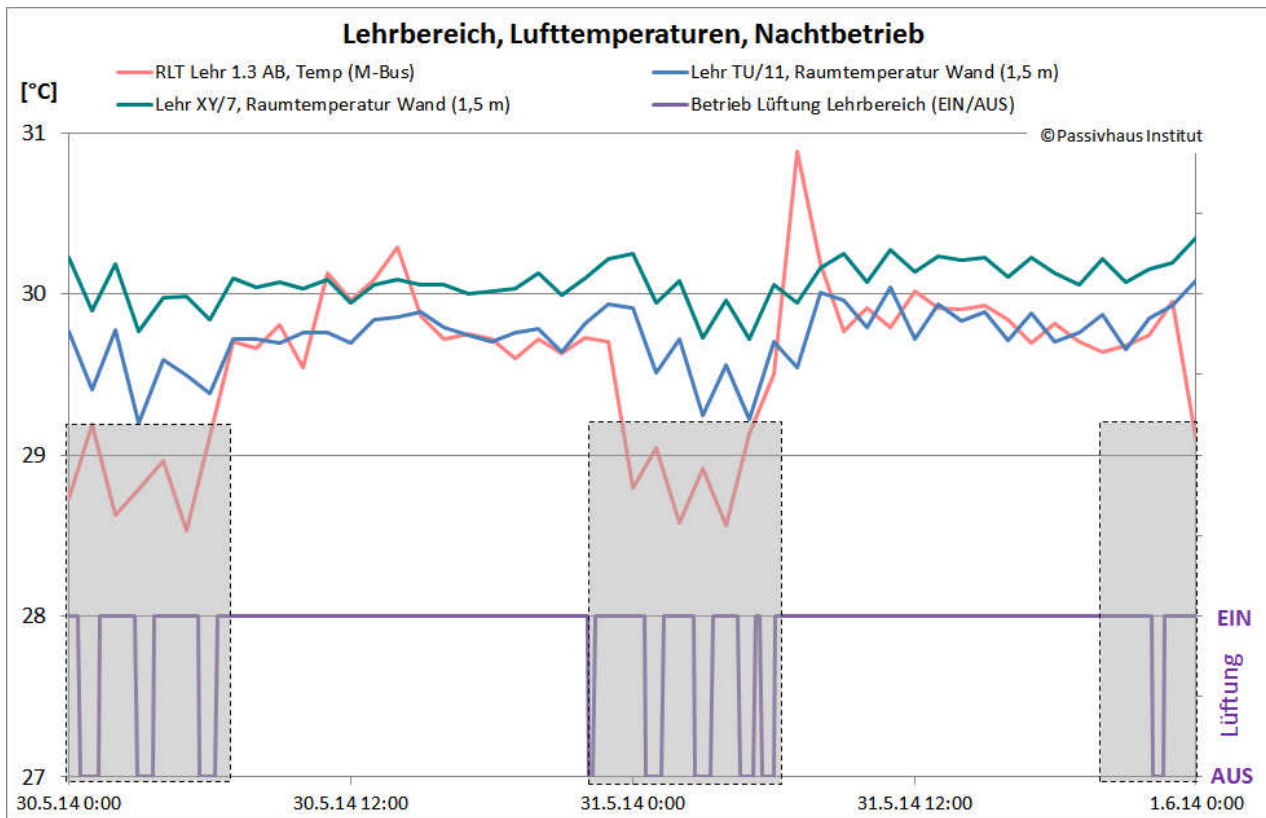


Abbildung 57: Verlauf der Lufttemperaturen im Lehrbereich: Dargestellt sind Stundenmittelwerte der Wandsensoren bei Lehrbecken 1 & 2 und des Abluffsensors innerhalb des Lüftungsgerätes für einen exemplarischen Zeitraum von 48 Stunden. Grau markiert sind die Zeiträume, in denen der Abluffsensor wegen der zeitweisen Abschaltung des Lüftungsgerätes (violett) für die Auswertung irrelevante Messwerte liefert.

Es lässt sich ein deutlicher jahreszeitlicher Verlauf in der relativen und absoluten Feuchte im Lehrbeckenbereich feststellen (siehe Abbildung 58 und Abbildung 59). Dieser ist dadurch bedingt, dass normgemäß aus Lufthygienegründen in Schwimmhallen immer ein Mindestluftwechsel stattfinden muss, der mit 15 % des Auslegungsvolumenstromes einhergeht. Diese Vorgabe hat Priorität vor allen anderen Sollwertvorgaben. Damit sieht beispielsweise die Betriebsweise des Lüftungsgerätes für beide Hallen des Lehrbeckenbereiches immer mindestens einen Außenluftvolumenstrom von ca. 3700 m³/h vor – ungeachtet, ob die Luftbedingungen eine Entfeuchtung notwendig machen oder nicht. Das führt dazu, dass im Winter die Hallenfeuchte deutlich unter den Sollwert absinkt, wenn bei trockener Außenluft ein höherer Volumenstrom gefahren wird, als der jeweilige Entfeuchtungsbedarf vorsieht.

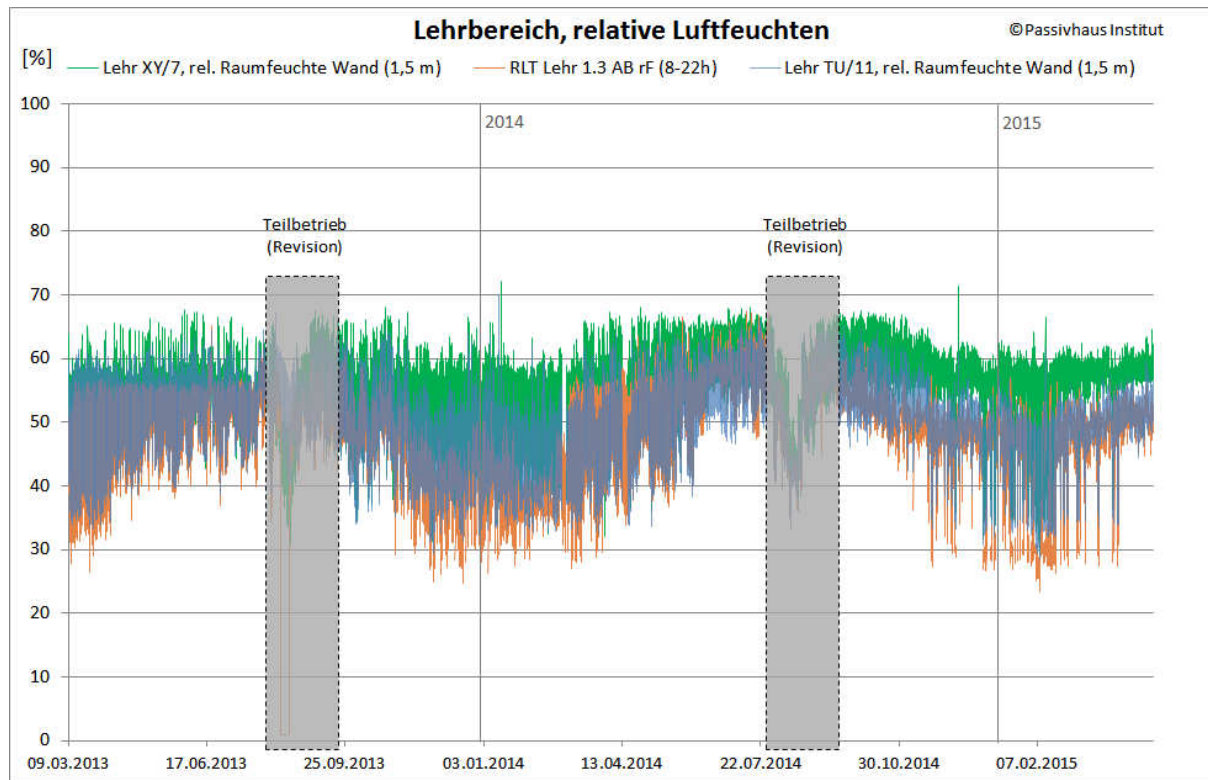


Abbildung 58: Verlauf der relativen Luftfeuchten im Lehrbereich: Dargestellt sind Messdaten der Wandsensoren bei Lehrbecken 1 & 2 und des Abluftsensors innerhalb des Lüftungsgerätes im gesamten Messzeitraum.

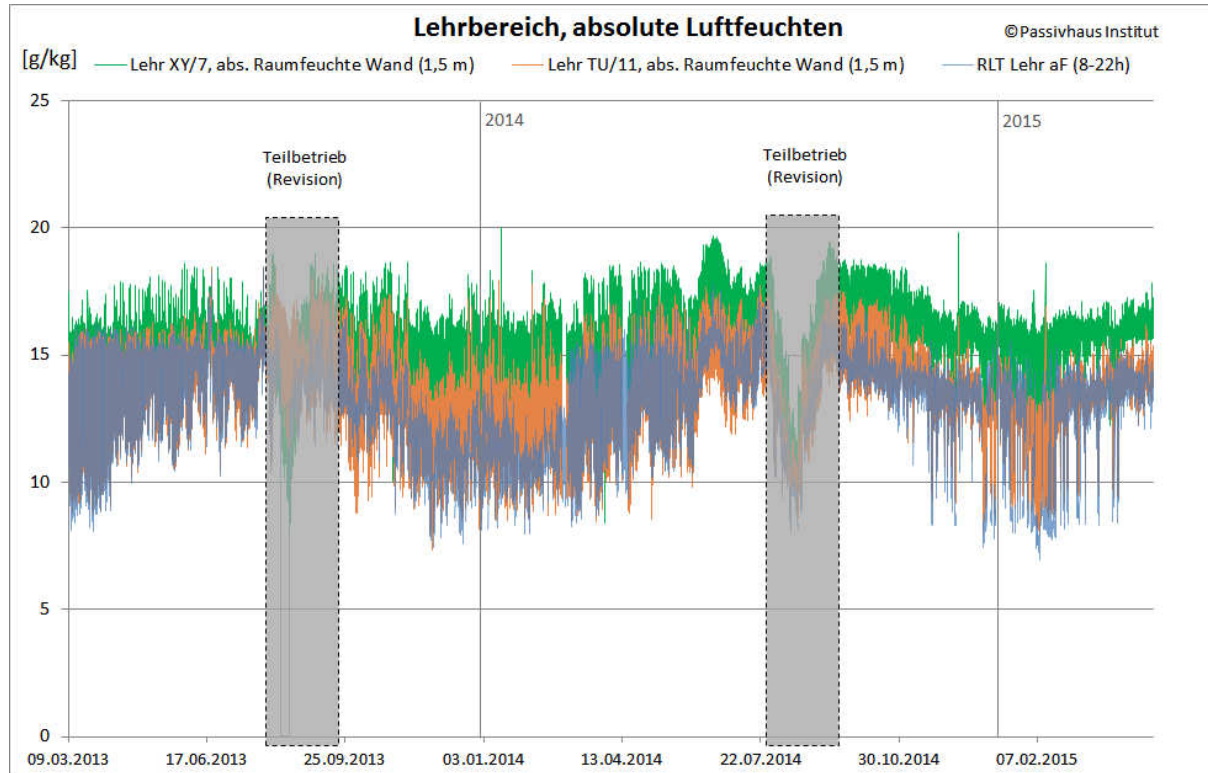


Abbildung 59: Verlauf der absoluten Luftfeuchten im Lehrbereich: Dargestellt sind Messdaten der Wandsensoren bei Lehrbecken 1 & 2 und des Abluftsensors innerhalb des Lüftungsgerätes im gesamten Messzeitraum.

5.6.4 Referenzsensoren für Hallenbedingungen

Da die Luftbedingungen in den Schwimmbereichen aufgrund von möglichen Schichtungs- und Durchströmungseinflüssen je nach Position im Raum stark variieren können, stellt sich die Frage nach der Festlegung von Referenzmessstellen für Temperatur und Feuchte. Dazu wurden verschiedene ergänzende temporäre Messungen durchgeführt.

In der ersten dieser Messungen wurde am 21.11.2013 ein flächendeckendes Messnetz auf den jeweiligen Höhen der Dauermessstellen (je 1,5 m von Bodenplatte) mithilfe von 17 Temperatur-Feuchte-Datenloggern (siehe auch 3.1 Temperatur- und Feuchtemessungen) für ca. vier Stunden im Bereich Freizeit und Sport installiert. Dabei wurden sechs Datenlogger im Sportbereich verteilt – davon einer zum direkten erneuten Vergleich mit der Dauermessstelle. Die elf weiteren Logger wurden im Freizeitbereich angeordnet – davon einer zum direkten erneuten Vergleich mit der Dauermessstelle. Zwei weitere wurden im Bereich des Obergeschosses zur Kontrolle einer möglichen Schichtung platziert. Die aus dem Versuch resultierenden Messwerte für Temperaturen und relative Feuchten wurden in absolute Feuchten umgerechnet und mit den Messdaten der Dauermessstellen (an den Wänden und in der Abluft) verglichen. Die Messung zeigte für die Temperaturen in beiden Bereichen eine gute Übereinstimmung mit den Dauermessstellen.

Für den hinteren Teil des Sportbereichs (Achse XY) ergaben sich mit denen der Dauermessstelle übereinstimmende Feuchtwerte (XY/1-2 mitte, Wandsensor in 1,5 m Höhe). An den vier anderen Messpunkten im Sportbereich lagen die Feuchtwerte deutlich höher, was darauf hindeutet, dass der hintere Teil des Sportbereiches besser mit Zuluft versorgt wird als der vordere.

Im Freizeitbereich lagen die Feuchtwerte alle in einem dünnen Band innerhalb ihrer Messgenauigkeiten, was für eine einheitliche Schichtung und Durchströmung der Hallenluft spricht.

In einem weiteren Versuch wurde mithilfe von 20 Datenloggern für Temperatur und relative Feuchte die Schichtung der Temperaturen und Feuchten in verschiedenen Höhen an verschiedenen Stellen im Sport- und Freizeitbereich über zwei Tage untersucht. Die Schichtung der Luftfeuchten stellt sich größtenteils wie erwartet ein. Die Auswertung zeigt, dass tagsüber durch Aktivitäten in den Becken mehr Verdunstung stattfindet als nachts. Zudem wurde festgestellt, dass die fest installierten einzelnen Dauermessstellen (Sportbereich Y/1-2 und Freizeitbereich MN/7) an den Wänden die klimatischen Bedingungen der Hallen unzureichend widerspiegeln. Insbesondere die Dauermessstelle im Freizeitbereich (MN/7 Mitte) ist maßgeblich durch die in der Nähe befindlichen Sprudelliegen beeinflusst. Daher ist eine ungeprüfte Angabe der durchschnittlichen Raumfeuchten allein durch die Messdaten dieser Dauermessstellen nicht ausreichend.

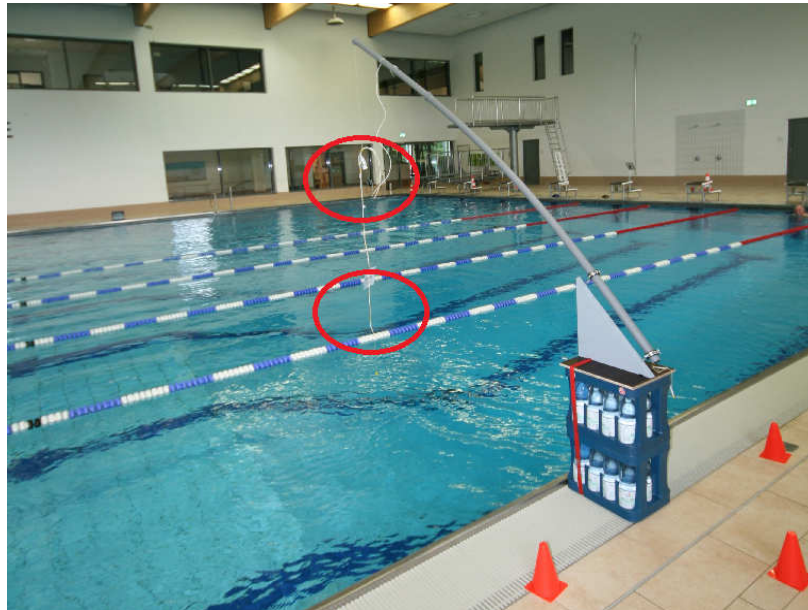


Abbildung 60: Messaufbau mit zwei Sensoren für Lufttemperatur- und feuchte (rote Markierungen) in unterschiedlicher Höhe über dem Sportbecken im Bambados

Es wird angenommen, dass die Temperaturen und Feuchten der jeweiligen Abluft einen Mischwert der Hallenluftbedingungen darstellen. Da die Lüftungsgeräte aber nicht kontinuierlich in Betrieb sind, sondern es auch gewollte nächtliche Stillstandszeiten gibt, müssen während dieser andere Messwerte herangezogen werden.

Durch grafische und rechnerische Vergleiche aller vorhandenen Temperatur- und Feuchtwerte und unter Berücksichtigung der beiden beschriebenen temporären Messungen werden für die Schwimmbereiche folgende Messdaten als Referenzwerte verwendet:

Referenz Sportbereich

Für den Sportbereich werden während des Betriebes der Lüftungsanlage die Mittelwerte der Messwerte der beiden Abluftsensoren und außerhalb des Betriebes die Mittelwerte der Messwerte der drei RA-Wandsensoren als Referenzwerte verwendet.

Referenz Freizeitbereich

Für den Freizeitbereich werden, analog zum Sportbereich, während des Betriebes der Lüftungsanlage die Mittelwerte der Messwerte der beiden Abluftsensoren und außerhalb des Betriebes die Mittelwerte der Messwerte der zwei RA-Wandsensoren als Referenzwerte angenommen.

Referenz Lehrbeckenbereich

Für den Bereich der beiden Lehrbecken werden die Messwerte des Wandsensors an Position EG-TU/11 als Referenzwerte angenommen. Dieser weist während des Betriebes der Lüftungsanlage eine sehr gute Deckung mit den Messwerten aus der Abluft auf.

5.6.5 Behaglichkeit

Die Behaglichkeit der Nutzer des Bades hat Priorität vor Energieeinsparungen. In [Schulz 2009] wurden die Auswirkungen auf die Behaglichkeit entsprechend dem allgemein anerkannten Verfahren nach DIN EN 7730 und ASHRAE2005 theoretisch untersucht. In der Praxis zeigt sich, dass das individuelle Empfinden der Hallenluftbedingungen durchaus unterschiedlich sein kann und von vielen verschiedenen Faktoren, die nicht theoretisch erfassbar sind, abhängig sind. Generell muss deutlich zwischen trockenen und nassen Personen unterschieden werden. Die Erfahrung im Bambados bestätigt, dass trockene Badegäste (z.B. Schwimmtrainer) eher trockenere Luft bevorzugen, während trockene Badegäste im Freizeitbereich auch höhere Feuchten als angenehm empfinden.

Da die Kriterien für die Behaglichkeit nur tagsüber (bei Badebetrieb) eingehalten werden müssen, können nachts höhere Feuchten zur weiteren Energieeinsparung realisiert werden.

Empfehlungen zur Behaglichkeit

- Sollwerte für Lufttemperatur und Luftfeuchte während Öffnungszeiten in Schwimmhallen sollten praktisch erprobt und nach Nutzerwünschen bedarfsangepasst gewählt werden.
- Positionen von Wandsensoren, die zu Regelungszwecken verwendet werden sollen, sind mit Bedacht zu wählen. Außerdem ist auf die Qualität der Sensoren und deren Kalibrierung Wert zu legen sowie deren Beschaffenheit regelmäßig zu prüfen.
- Es ist sinnvoll Bereiche unterschiedlicher Nutzung (Sportbereich, Freizeitbereich, Ruhebereich etc.) hinsichtlich der Temperatur und Feuchte baulich zu trennen.
- Für Freizeit- oder Erlebnisbereiche kann durchaus ein „tropisches Klima“ mit erhöhter Feuchte wünschenswert sein.
- Nicht nur aus Gründen der Energieeinsparung sollte der Umluftanteil der Lüftungsgeräte so weit wie möglich reduziert werden, da dadurch auch eventuelle Zugerscheinungen vermieden werden.

5.6.6 Bautenschutz

Mit den realisierten hohen Bauteilqualitäten ergeben sich das ganze Jahr über hohe Innenoberflächentemperaturen. Dadurch können in Passivhaus-Hallenbädern höhere Luftfeuchten als in Bädern mit schlechterer Hülle realisiert werden. Damit lässt sich der Luftwechsel reduzieren, was direkt in einem verminderten Stromverbrauch der Lüftungsgeräte und Heizenergieverbrauch für die Hallenluft resultiert. Indirekt bedingt dies niedrigere Verdunstungsraten und damit auch einen niedrigeren Heizenergieverbrauch zur Nachheizung des Beckenwassers. Eine Anhebung der Hallenfeuchte kann an den Wärmebrücken von Gebäudehüllen von Standardbädern zu hohen Feuchten bzw. Kondensatbildung führen. Da zum Bau des Bambados für den Dachbereich noch keine RWA-Öffnungen in entsprechender Bauteilqualität verfügbar waren und diese somit massiv die Anhebung der Feuchte begrenzt hätten, wurden shedartige Dachaufbauten mit vertikalen offenen Lochfenstern realisiert.

Die kalibrierten Fensteroberflächenfühler (Glasrand) zeigten durchgängig auch bei kalten Außentemperaturen von -8 °C bis -12 °C Messwerte, die mindestens 3 K oberhalb des jeweiligen Taupunktes der Hallenluft lagen. Zum Zeitpunkt mit der niedrigsten gemessenen Außentemperatur im Messzeitraum ergeben die Hallenbedingungen (Lufttemperatur und -feuchte) einen Taupunkt von 16,0 °C, während die niedrigste gemessene Fensteroberflächentemperatur über 19 °C liegt (siehe Abbildung 61). Somit kann Kondensatbildung an den Messpunkten X/1-2 im Sportbereich, /11 im Freizeitbereich und W/10 im Lehrbereich während des gesamten Messzeitraums ausgeschlossen werden.

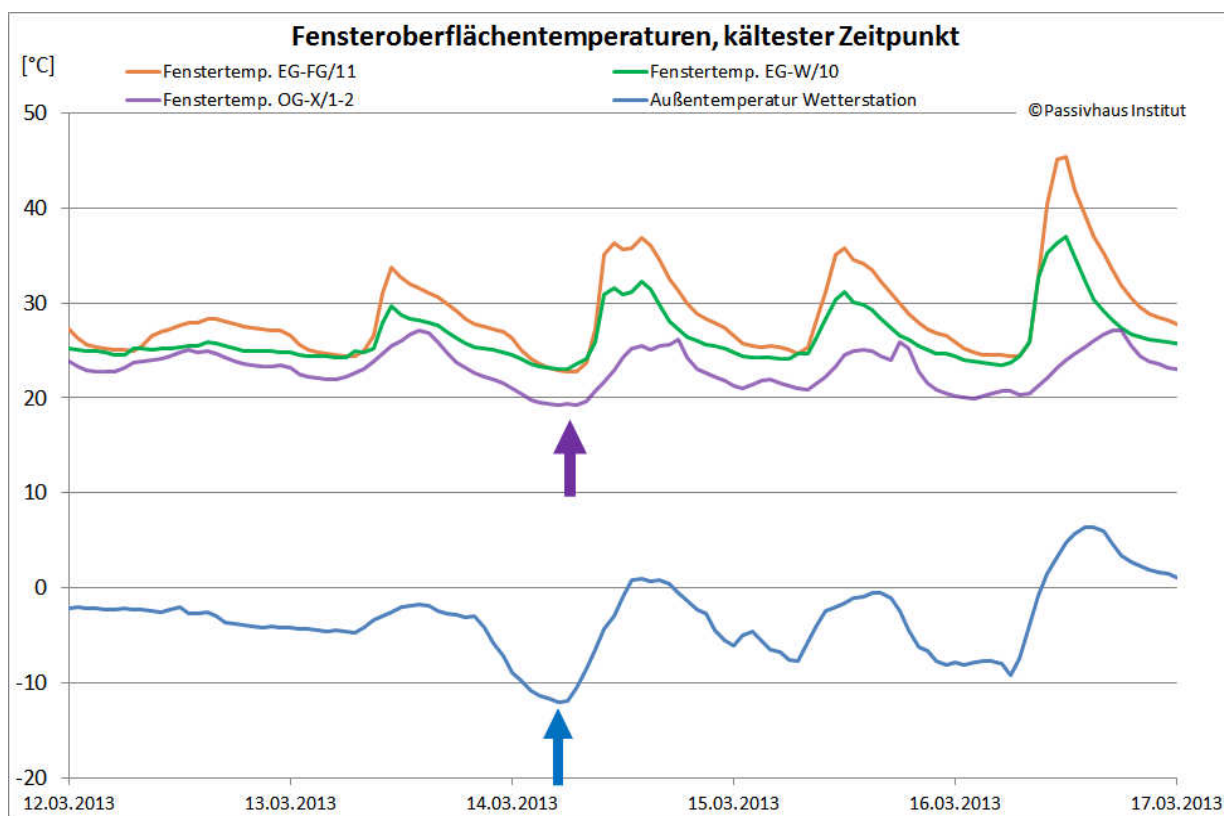


Abbildung 61: Fensteroberflächentemperaturen mit Außenlufttemperatur zum kältesten Zeitpunkt in der gesamten Messzeit. Bei einer Außenlufttemperatur von -12,1 °C (blau) wird eine Temperatur von minimal 19,2 °C (lila) an einer Fensteroberfläche im Sportbereich gemessen. (Die hohen Peaks der Fensteroberflächentemperaturen sind durch Sonneneinstrahlung bedingt.)

Im Bambados findet jährlich eine Begehung durch einen Sachverständigen zur Überprüfung der Bauschadensfreiheit statt sowie zusätzlich regelmäßige Wartungen durch alle relevanten Fachfirmen.

Empfehlungen

Beim Bambados trägt die Passivhaus-Gebäudehülle wesentlich zum Bautenschutz bei. Unabhängig davon, ob es sich um ein Hallenbad nach Passivhaus-Konzept handelt, oder nicht, können bei den entsprechenden Luftbedingungen (Luftfeuchte, -temperatur und chemische Zusammensetzung) folgende Empfehlungen ausgesprochen werden:

- Zur Orientierung sollten auch bei anderen Bädern Temperatur- und Luftfeuchtesensoren mit hohen Messgenauigkeiten ($T: \pm 0,1 \text{ K}$; $rF: \pm 1 \%$ in den relevanten Bereichen) in der Nähe von

eventuell kritischen Punkten der Gebäudehülle installiert werden. Diese sollten kalibriert und deren Messwerte regelmäßig auf Plausibilität überprüft werden.

- Auch Abluftsensoren und Sensoren, die die Luftbedingungen für die Badegäste widerspiegeln und zur Lüftungsregelung dienen und somit entscheidend für die realen Hallenluftbedingungen sein können, sollten über hohe Messgenauigkeiten verfügen, kalibriert sein und regelmäßig überprüft werden.
- Es ist denkbar, dass in Zukunft Korrosionssensoren, die auch an unzugänglichen Stellen verbaut werden können, einen zuverlässigen Indikator für die Bauschadensfreiheit darstellen.
- Turnusmäßige Überprüfungen der Bauteilzustände im Bestand durch unabhängige Sachverständige sind in jedem Falle durchzuführen.

5.6.7 Luftqualität: Trihalogenmethan-Konzentrationen

Das Bambados wird mit einer gegenüber Standard-Hallenbädern veränderten Lüftungsstrategie betrieben. Der wichtigste Punkt dabei ist die Reduktion bzw. der völlige Verzicht auf den Umluftanteil in den Hallen. Zur Kontrolle der Raumluftqualität hat das PHI orientierende Messung der Konzentration von Trihalogenmethanen (THM) in der Hallenluft an neun verschiedenen Messstellen durchführen lassen. Die Messungen wurden von einem Mitarbeiter des Chemischen Labors Graser (CLG) am 06.02.2014 durchgeführt und von einem Mitarbeiter des PHI begleitet. Dazu wurde an jeder der Messstellen die Luft 20 cm über den Wasseroberflächen der Becken jeweils 20 Minuten lang mit einem Volumenstrom von 1 l/min auf Aktivkohle gesaugt und nachfolgend im Labor analysiert. Am 11.03.2014 wurde die Messung bei geänderten Lüftungseinstellungen (ohne Umluft) und sonst gleichen Bedingungen wiederholt (gleiche Messstellen, gleiches Messverfahren und gleicher Probennehmer) [CLG 2014].

Da im Gegensatz zur Beckenwasserkonzentration (noch) keine Richt- oder Normwerte für THM in der Luft existieren, kann lediglich auf Literaturwerte Bezug genommen werden. Die als Ergebnis dargestellten THM-Werte sind normgemäß errechnete Summenwerte der gemessenen vier Einzelparameter (Trichlormethan, Bromdichlormethan, Dibromchlormethan und Tribrommethan), gewichtet umgerechnet auf die Verbindung Trichlormethan.

Laut Veröffentlichungen des Umweltbundesamtes (1994) und Eichelsdörfer (1996) liegt der Mittelwert für 70 Messungen der THM-Konzentration in der Hallenbadluft in einer Höhe von 20 cm über der Wasseroberfläche bei $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Minimum $7,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und Maximum $219 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [GSF 1997]. Untersuchungen durch das Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg der letzten Jahre ergaben eine durchschnittliche THM-Belastung der Luft (20 cm über der Wasseroberfläche) in Hallenbädern von ca. $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Minimum $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Maximum $192 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [GesAmtBW 2015].

In den nachfolgenden Grafiken sind jeweils die Volumenströme der Lüftungsgeräte (Zu- und Außenluft) mit den THM-Messwerten und die vom Probennehmer temporär gemessenen Lufttemperaturen, relativen Luftfeuchten sowie den jeweiligen Anzahlen der Badegäste im Umkreis von ca. 10 m dargestellt.

Gleichzeitig mit den Luftmessungen wurden durch das beauftragte Labor auch Proben des Beckenwassers genommen und analysiert. Die dabei festgestellten THM-Konzentrationen des Wassers lagen bei allen Messungen in etwa in gleicher Höhe zwischen 9 und 14 µg/l.

Ein Grundriss mit den Positionen der Messstellen findet sich im Anhang.



Abbildung 62: Messung von Trihalogenmethanen 20 cm über der Wasseroberfläche des Freizeitbeckens, Luftansaugung auf Aktivkohle

Hallenluft Lehrbecken

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Hallenluft der beiden Lehrbecken an den beiden Messtagen sind in Abbildung 63 und Abbildung 64 dargestellt. Es gibt je Becken eine Messstelle (MS7: Becken 1; MS8: Becken 2). Die blauen Linien geben den Zeitraum der THM-Messungen und die Höhe der ermittelten THM- Konzentrationen (Bezug auf die rechte y-Achse) an.

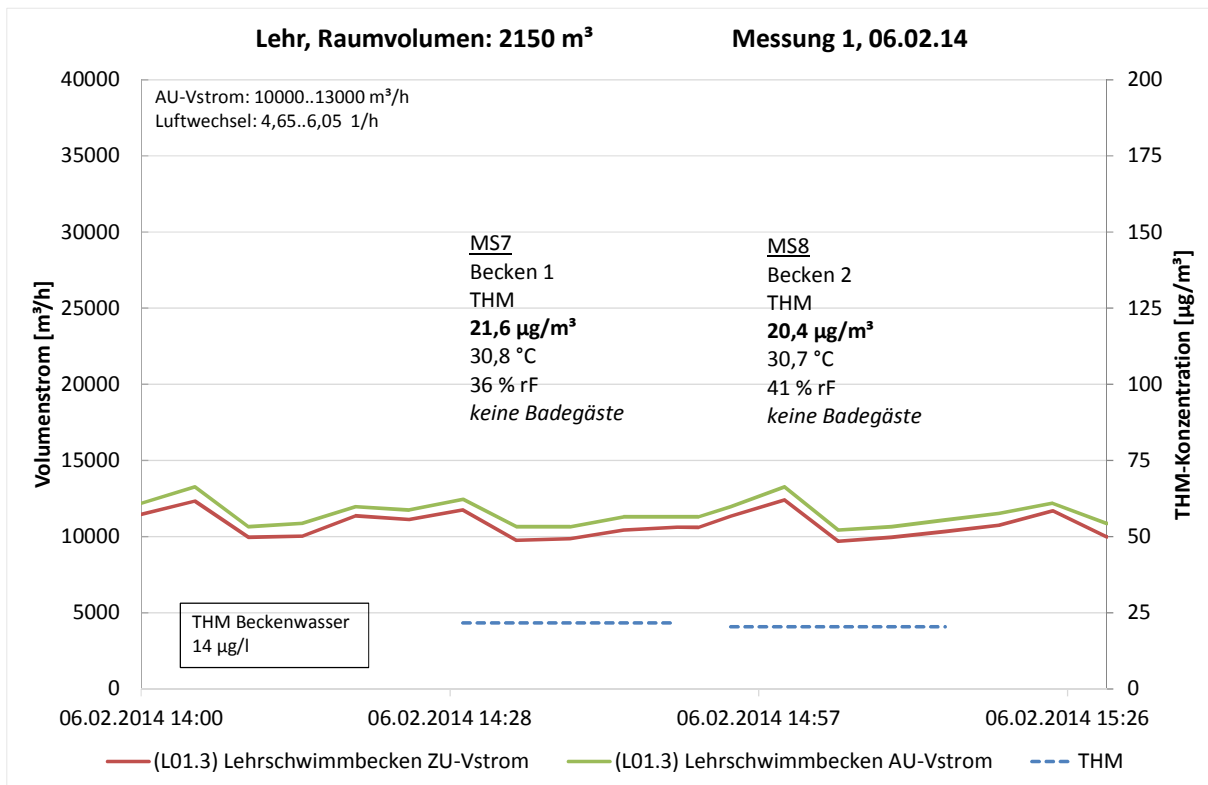


Abbildung 63: Messwerte Lehrbecken 1 und 2 für Volumenströme und THM der ersten Messung (06.02.14), Messstellen 7 und 8

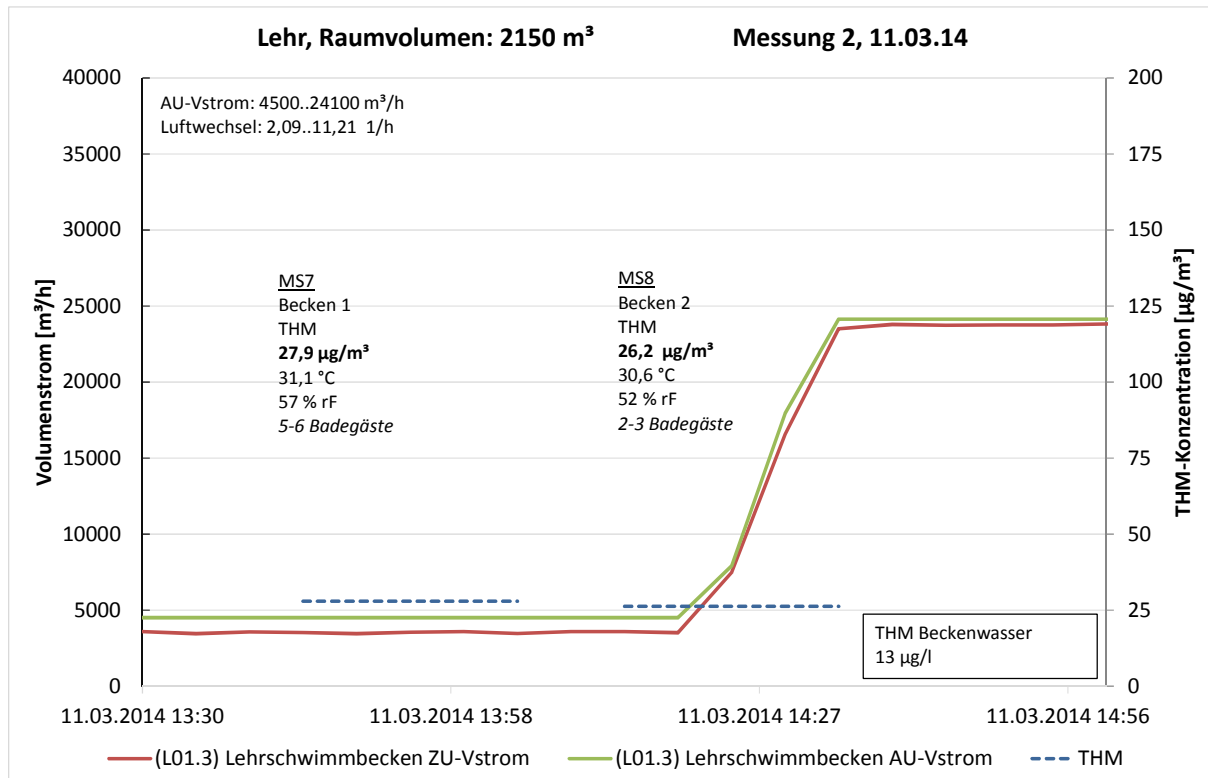


Abbildung 64: Messwerte Lehrbecken 1 und 2 für Volumenströme und THM der zweiten Messung (11.03.14), Messstellen 7 und 8

Die THM-Messwerte der beiden Lehrbecken liegen mit Werten zwischen 20,4 und 27,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ verglichen mit den Durchschnittswerten aus der Literatur an beiden Tagen in einem niedrigen Bereich. Dabei liegen die Werte des zweiten Messtages geringfügig über denen des ersten. Ob die Ursache im zeitweise niedrigeren Volumenstrom und/oder der Anzahl der Badegäste begründet ist, kann aus den vorliegenden Stichproben nicht abgeleitet werden. An beiden Tagen wurde keine Umluft gefahren.

Hallenluft Freizeitbecken

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Hallenluft des Freizeitbeckens an den beiden Messtagen sind in Abbildung 65 und Abbildung 66 (erste Messung, 06.02.14) sowie Abbildung 67 (zweite Messung, 11.03.14) dargestellt. In der Halle des Freizeitbeckens wurden drei Messstellen eingerichtet (MS1, MS2 und MS9).

Die blauen Linien geben den Zeitraum der THM-Messungen und die Höhe der ermittelten THM-Konzentrationen (Bezug auf die rechte y-Achse) an.

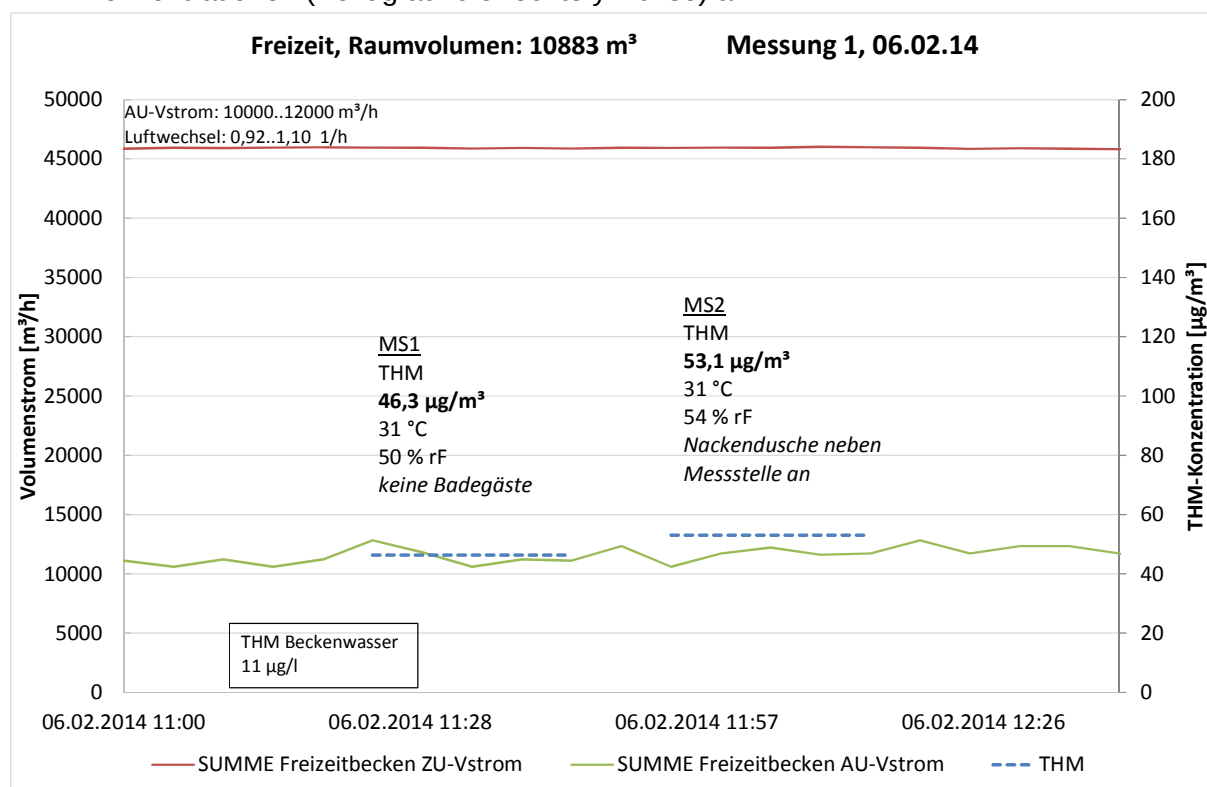


Abbildung 65: Messwerte Freizeitbecken für Volumenströme und THM der ersten Messung (06.02.14), Messstellen 1 und 2

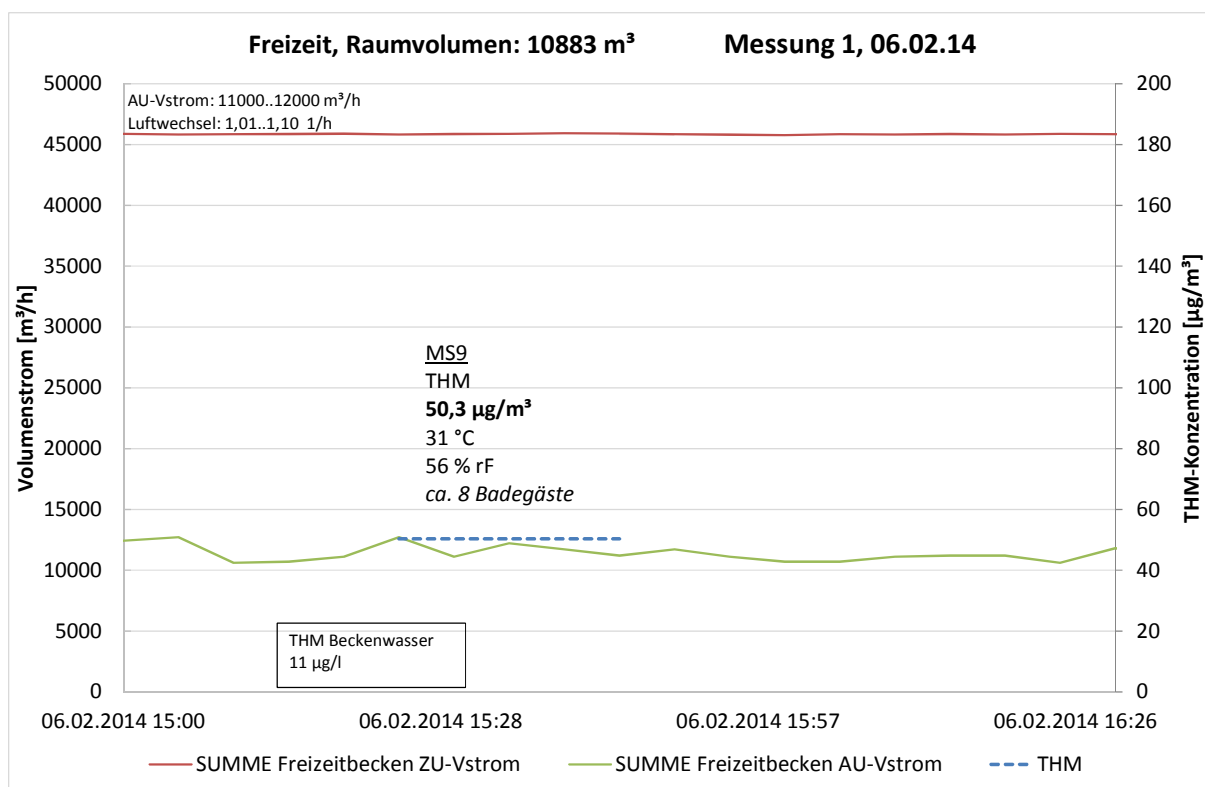


Abbildung 66: Messwerte Freizeitbecken für Volumenströme und THM der ersten Messung (06.02.14), Messstelle 9

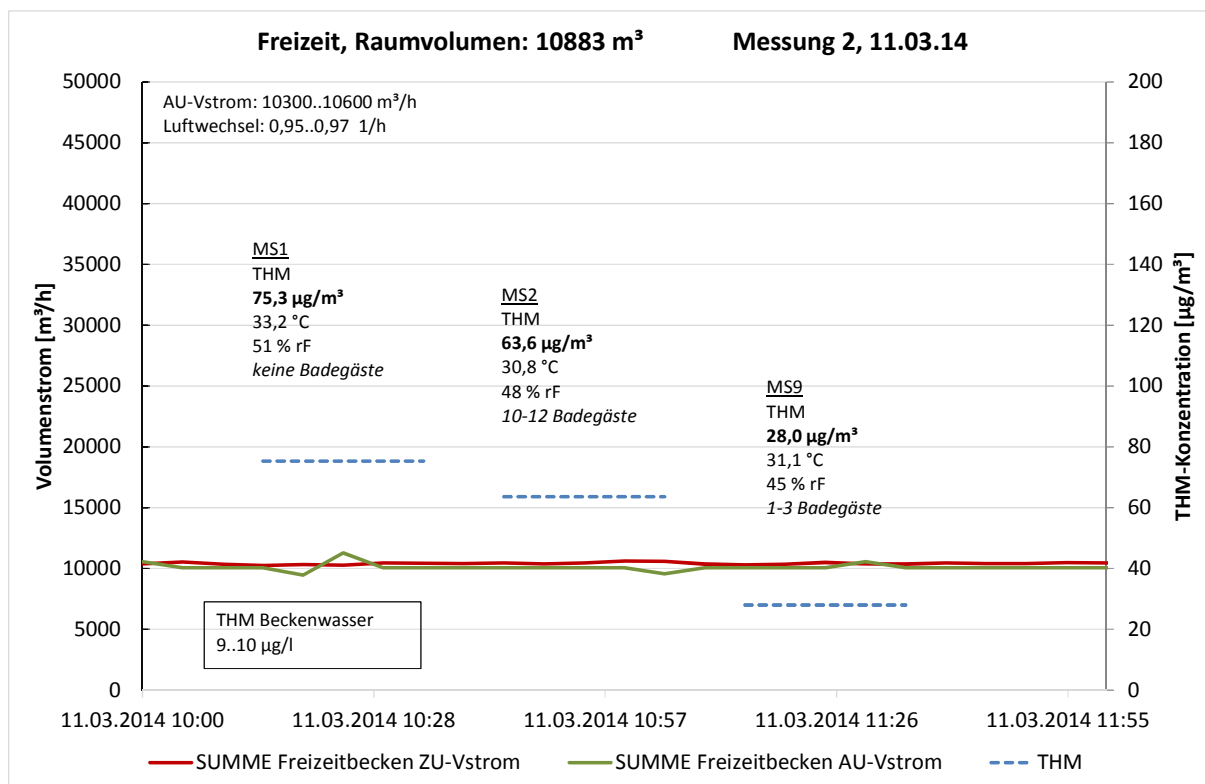


Abbildung 67: Messwerte Freizeitbecken für Volumenströme und THM der zweiten Messung (11.03.14), Messstellen 1, 2 und 9

Die THM-Messwerte des Freizeitbeckens liegen für die erste Messung (06.02.14) unmittelbar um den Mittelwert des Landesgesundheitsamtes Baden-Württemberg von ca. $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bei der zweiten Messung (11.03.14) wurden für Messstelle MS1 und MS2 am Freizeitbecken etwas höhere Werte festgestellt. Für Messstelle 9 wurde dagegen ein niedrigerer Wert gemessen.

Gegenüber der Erstmessung entfällt bei der Zweitmessung der Umluftanteil (Zuluftvolumenstrom: 10.000 anstelle $46.000 \text{ m}^3/\text{h}$). Da trotz unverändertem Außenluftvolumenstrom die THM-Werte der Zweitmessung bei MS9 deutlich am niedrigsten liegen, kann die reduzierte Umluft nicht ursächlich für die höheren Werte bei MS1 und MS2 sein. Weitere Klärung der Ursachen (Personenzahl, Personenaktivität, Um- und Außenluftvolumenstrom) sind notwendig um die Zusammenhänge genauer zu analysieren.

Hallenluft Sportbecken

Am Sportbecken mit den 50 Meter Bahnen wurden vier Messstellen zur Untersuchung der Hallenluft eingerichtet (MS3, MS4, MS5 und MS6). Die Ergebnisse der Untersuchungen der Hallenluft des Sportbeckens an den beiden Messtagen sind in Abbildung 68 (erste Messung, 06.02.14) und Abbildung 69 (zweite Messung, 11.03.14) dargestellt. Die blauen Linien geben den Zeitraum der Messungen und die Höhe der ermittelten THM-Konzentrationen an (sekundäre y-Achse).

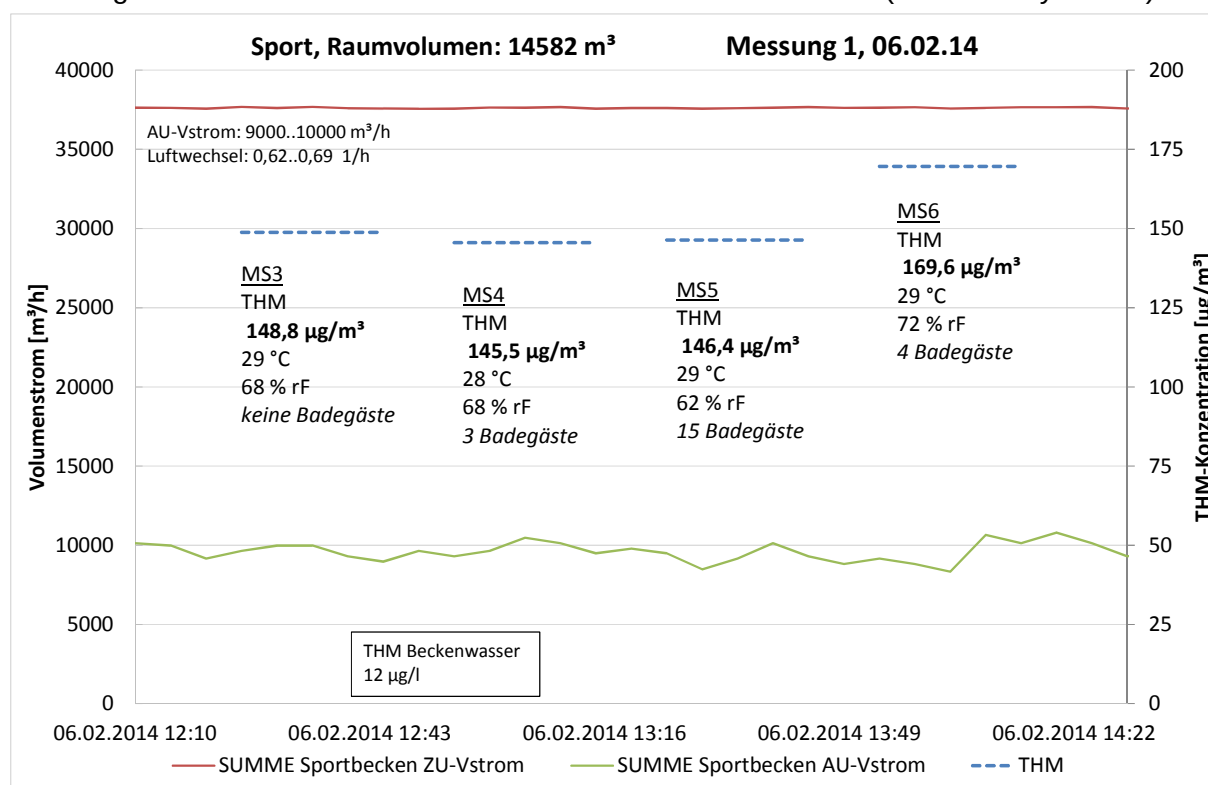


Abbildung 68: Messwerte Sportbecken für Volumenströme und THM der ersten Messung (06.02.14), Messstellen 3, 4, 5 und 6

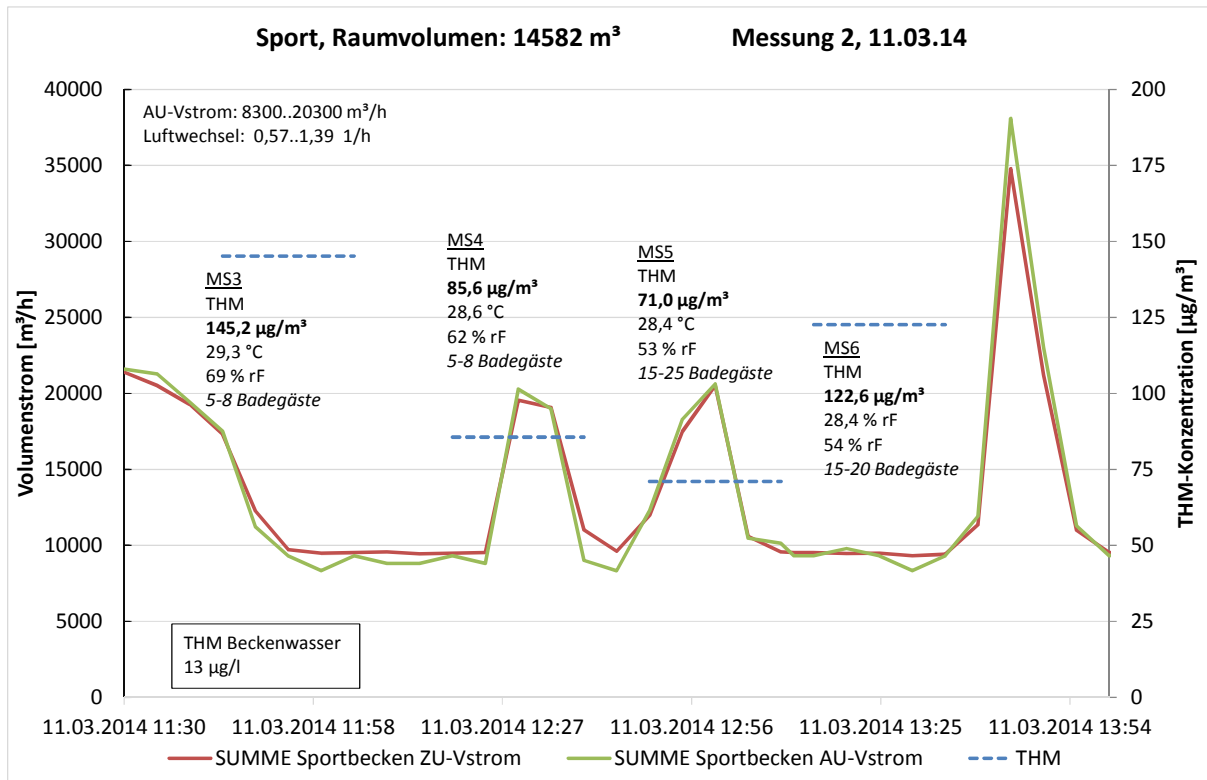


Abbildung 69: Messwerte Sportbecken für Volumenströme und THM der zweiten Messung (11.03.14), Messstellen 3, 4, 5 und 6

Die THM-Messwerte beim Sportbecken erreichen vergleichsweise hohe Werte, unabhängig von der Höhe des Umluftanteils der Zuluft (ca. 37.500 m³/h am ersten Messtag vgl. (Abbildung 68)).

Die zunächst naheliegende Vermutung, dass die Werte des zweiten Messtages an den Messstellen 4 und 5 niedriger sind weil der Außen- und Umluftvolumenstrom temporär erhöht wurde, wird durch den hohen Wert an Messstelle 3 (dort herrscht vor und während erster Hälfte der THM-Messung ein erhöhter Volumenstrom) nicht bestätigt. Dies müsste sich sonst als Reduktion des THM-Messwerts auswirken. Die vorliegende orientierende Messung reicht in diesem Falle nicht aus, um eine abschließende Ableitung der Ursachen vornehmen zu können.

Es muss allerdings vermutet werden, dass die Einbringung und Absaugung der Luft in der gleichen Ebene an der Hallendecke bzw. die Einbringung der Zuluft durch die vorhandenen Drallauslässe (impulsarm) Grund für eine schlechte Hallendurchströmung sind. Gestützt wird diese Annahme auch durch die Analyse von Rauchversuchen durch Herrn Kaluza (Fa. Inco) [Kaluza 2014]. Die gleichzeitige Einbringung und Absaugung an der Decke könnte optimiert werden, indem die Abluftventile in den unteren Teil der Halle verlegt werden.

Zusammenfassung: THM-Konzentration

Insgesamt zeigen die stichprobenartigen THM-Messungen der Hallenluft in drei der vier Hallen des Bambados niedrige bis durchschnittliche THM-Konzentrationen in Bezug auf die Vergleichswerte aus der Literatur. In der Sportbereich sind die Messwerte dagegen erhöht; der Umluftvolumenstrom am ersten Messtag verbessert dies nicht. Als Ursache für die höheren THM-Werte wird die ungünstige Position der Lufteinbringung und Absaugung (beides an der Decke) bzw. die impulsarme

Luftzuführung vermutet. Zur Abhilfe gibt es einen Vorschlag zur relativ einfach durchführbaren Verlegung der Abluft-Ansaugung in den unteren Teil der Halle.

Die genauen Zusammenhänge und Ursachen der Höhe der THM-Konzentrationen der Hallenluft in Bezug auf die THM-Konzentration im Beckenwasser, den Um- und Außenluftanteilen, der Anzahl der Badegäste sowie der Aktivität der Badegäste können mithilfe dieser orientierenden Untersuchung nicht ermittelt werden. Es zeigt sich aber, dass die Reduktion des Umluftvolumenstromes keinen negativen Einfluss auf die THM-Konzentration in der Luft zu haben scheint.

Als Übersicht über alle THM-Messwerte beider Untersuchungstage sind die Analysewerte in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 8: Trihalogenmethan-Konzentrationen der Hallenluft an zwei Messtagen

THM-Konzentration [µg/m³]	Messtag 1 (06.02.2014)	Messtag 2 (11.03.2014)
Lehrbecken		
MS 7	21,6 ohne Umluft	27,9 ohne Umluft
MS 8	20,4 „	26,2 „
Freizeitbecken		
MS 1	46,3 mit Umluft	75,3 ohne Umluft
MS 2	53,1 „	63,6 „
MS 9	50,3 „	28,0 „
Sportbecken		
MS 3	148,8 mit Umluft	145,2 ohne Umluft
MS 4	145,5 „	85,6 „
MS 5	146,4 „	71,0 „
MS 6	169,6 „	122,6 „

5.7 Lüftung Halle

Aufgabe der Lüftung in einer Schwimmhalle ist es, zu entfeuchten und für gute Luftqualität zu sorgen. Zusätzlich wird die Zuluft genutzt, um mit Hilfe eines Heizregisters in der Zuluft die Halle zu beheizen. Auf Basis der Grundlagenuntersuchung [Schulz 2009] wurde mit folgendem Konzept in der Planungsphase gestartet.

5.7.1 Konzept

Die Geräte wurden nach dem maximalen Volumenstrom nach [VDI 2089] (hier bezeichnet als „VDI 100%“) ausgelegt. Im Betrieb soll tagsüber der zur Entfeuchtung notwendige Außenluftvolumenstrom gefahren werden, aber mindestens 15 % des maximalen Volumenstroms (siehe [VDI 2089]). Auf einen zusätzlichen Umluftvolumenstrom kann aufgrund der thermisch hochwertigen Gebäudehülle verzichtet werden. Nachts sollen die Lüftungsgeräte ausgeschaltet werden, während die Höhe der Feuchte in der Halle durch Sensoren im Raum überwacht wird. Bei Bedarf werden die Lüftungsgeräte zur Entfeuchtung eingeschaltet. Vor dem Betrieb wird durch ein Vorspülen die Raumluft ausgetauscht und falls notwendig die geringe Temperaturabsenkung der Nacht wieder ausgeglichen. Da eine höhere Feuchte einen geringeren Energieverbrauch zur Folge hat, sollte die Feuchte nachts, soweit bauphysikalisch möglich, angehoben werden. Tagsüber muss sich die Höhe der Feuchte vor allem nach der Behaglichkeit der Nutzer richten. Im Gegensatz zur üblichen Fahrweise nach [VDI 2089] mit konstantem Zuluftvolumenstrom (Außen- und Umluftvolumenstrom), variiert dieser im Bambados. Aus diesem Grund soll die Lufteinbringung in die Halle (und damit die Durchströmung der Raumluft) durch Versperren von Zuluftventilen mittels Klappen auch bei niedrigem Volumenstrom sichergestellt werden.

Als das Bambados in Betrieb genommen wurde, liefen die Lüftungsanlagen nicht nach diesem Konzept, sondern teilweise mit Standardprogrammen des Geräteherstellers. Die gewünschte Regelung wurde leider nur schrittweise und über einen langen Zeitraum hinweg im Programm der Lüftungsgeräte umgesetzt. Vor diesem Hintergrund sollten die Diagramme und Zahlenwerte in diesem Bericht betrachtet werden.

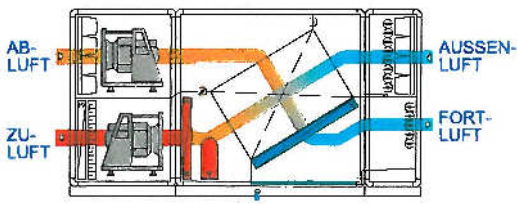
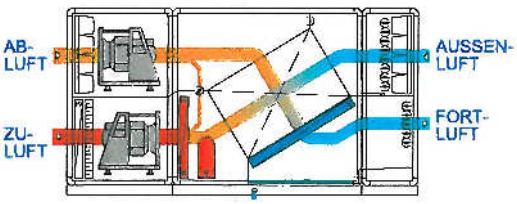
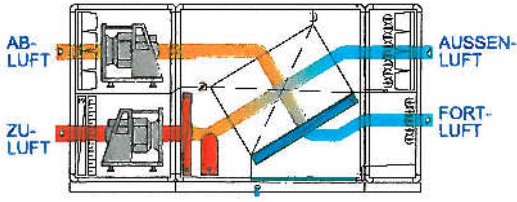
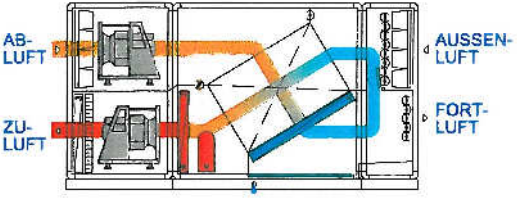
Tagbetrieb		
a		Reiner Außenluftbetrieb: • Entfeuchten: Fortluft wird durch trockenere Außenluft ersetzt. • Energierückgewinnung durch Wärmetauscher und Wärmepumpe • Bei Bedarf wird Zuluft nachgeheizt.
a'		Wenn der Volumenstrom der Zuluft nicht zum Heizen der Halle ausreicht, wird zusätzlich Umluft „Heizen“ gefahren (Umluft geht nicht über den Wärmetauscher).
Nachtbetrieb		
a		Bei Entfeuchtungsbedarf wird wie im Tagbetrieb reiner Außenluftbetrieb gefahren.
b		Wenn die Außentemperaturen sehr kalt sind, kann alternativ Umluft „Entfeuchten“ gefahren werden: • Entfeuchtung durch Wärmepumpe (WP) • Wärmerückgewinnung durch Wärmepumpe

Abbildung 70: Betriebsweisen der Hallenlüftungsgeräte (Bilder von Menerga, bearbeitet vom Passivhaus Institut) In der Praxis hat sich gezeigt, dass nur eine Betriebsweise (a) benötigt wird, solange die Wärmepumpen nicht in Betrieb sind.

5.7.2 Betriebsweisen im Überblick

Die drei folgenden Diagramme zeigen einen Überblick zu Betriebsweisen der Lüftungsgeräte für die Halle über einen längeren Zeitraum. Bei allen Geräten lässt sich, wie zu erwarten, eine Korrelation zwischen Außenvolumenstrom und absoluter Feuchte der Außenluft erkennen. Die jahreszeitlichen Schwankungen sind im Sport- und Lehrbereich stärker ausgeprägt als im Freizeitbereich.

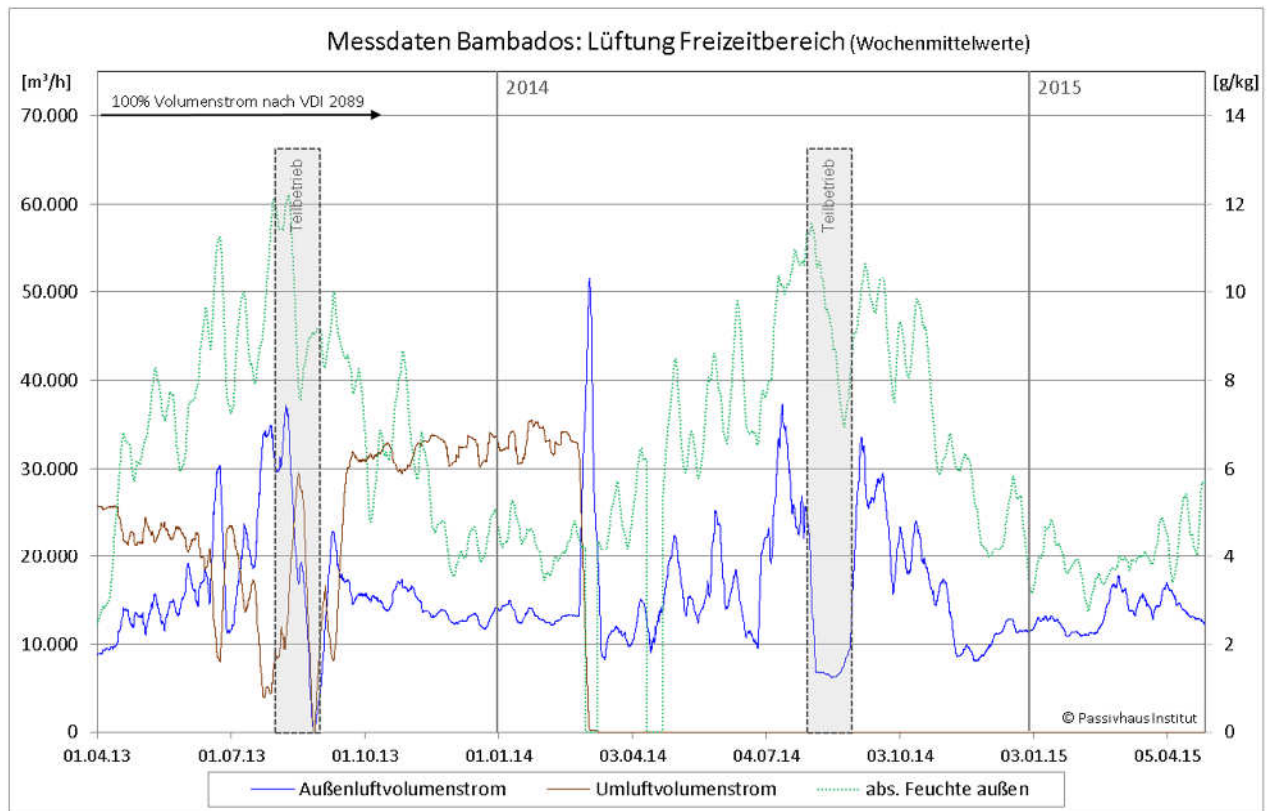


Abbildung 71: Übersicht: Betriebsweise Lüftungsgeräte Freizeit (dargestellt sind im Stundenintervall die gleitenden Wochenmittelwerte)

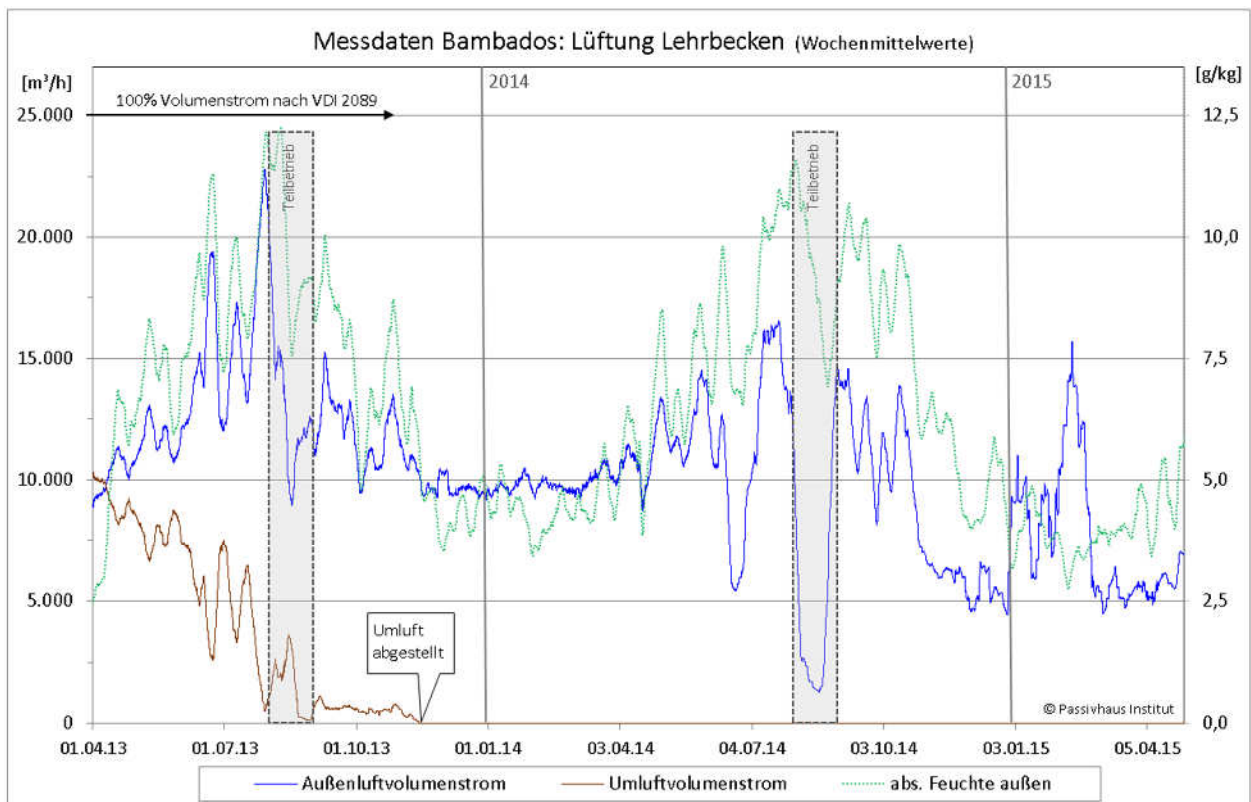


Abbildung 72: Übersicht: Betriebsweise Lüftungsgeräte Lehrbecken (dargestellt sind im Stundenabstand die gleitenden Wochenmittelwerte)

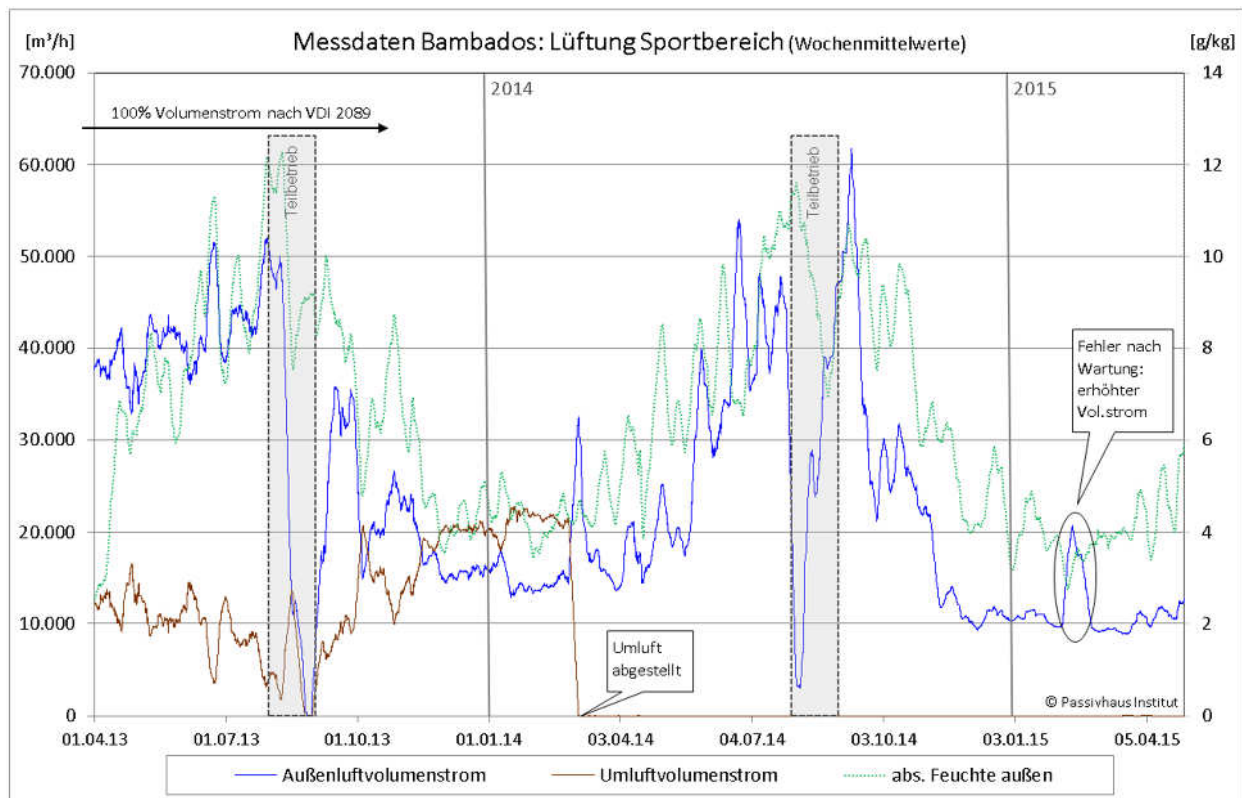


Abbildung 73: Übersicht: Betriebsweise Lüftungsgeräte Sport+Rutschen (dargestellt sind im Stundenintervall die gleitenden Wochenmittelwerte)

Die Halle wird entfeuchtet, indem feuchte Abluft durch trockene Außenluft ersetzt wird. D.h. der blau dargestellte Volumenstrom entfeuchtet und sorgt gleichzeitig für frische Außenluft, während der Umluftvolumenstrom (braun) nicht zu diesen beiden Aufgaben beiträgt. In Abbildung 71 ist im Winter 2013/2014 besonders deutlich zu erkennen, dass ein hoher Umluftvolumenstrom von den Ventilatoren der Lüftungsgeräte befördert werden muss. Dieser Umluftvolumenstrom hat keinen Nutzen, verdoppelt aber den Zuluftvolumenstrom in diesem Zeitraum, d.h. mehr als doppelt so hohe Stromkosten sind die Folge. Die Geräte konnten, wie in den Diagrammen zu erkennen, nach und nach auf den Betrieb ohne Umluft umgestellt werden, was sich auch deutlich im Strombedarf bemerkbar macht.

(Ergänzung zu den vorherigen Diagrammen: Die Lüftungsgeräte sind technisch so ausgestattet, dass sie sowohl einen Umluftanteil am Wärmetauscher vorbei („Umluft Heizen“, braune Kurve) und einen Umluftanteil über den Wärmetauscher und den Verdampfer („Umluft Entfeuchten“) fahren können. „Umluft Entfeuchten“ ist in der blauen Kurve (Außenluft) enthalten, allerdings nimmt sie nur einen geringen Anteil an. Ab dem Zeitpunkt, ab dem „Umluft Heizen“ „abgestellt“ werden konnte, gibt es auch kein „Umluft Entfeuchten“ mehr.

5.7.3 Volumenstrom und Stromverbrauch

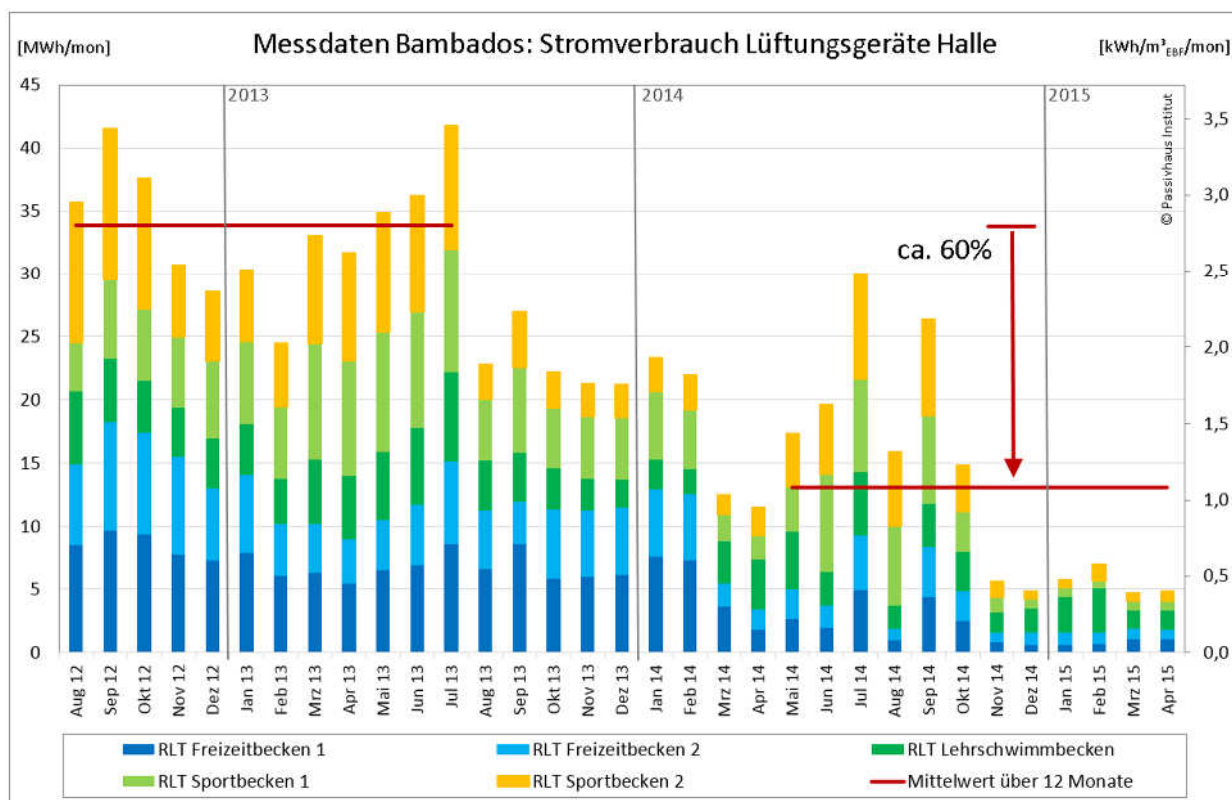


Abbildung 74: Stromverbrauch der Lüftungsgeräte für den Schwimmhallenbereich. Durch Optimierung der Regelung im Betrieb konnte der Stromverbrauch deutlich gesenkt werden. (In Rot dargestellt sind die durchschnittlichen Monatswerte gemittelt jeweils über zwölf Monate.)

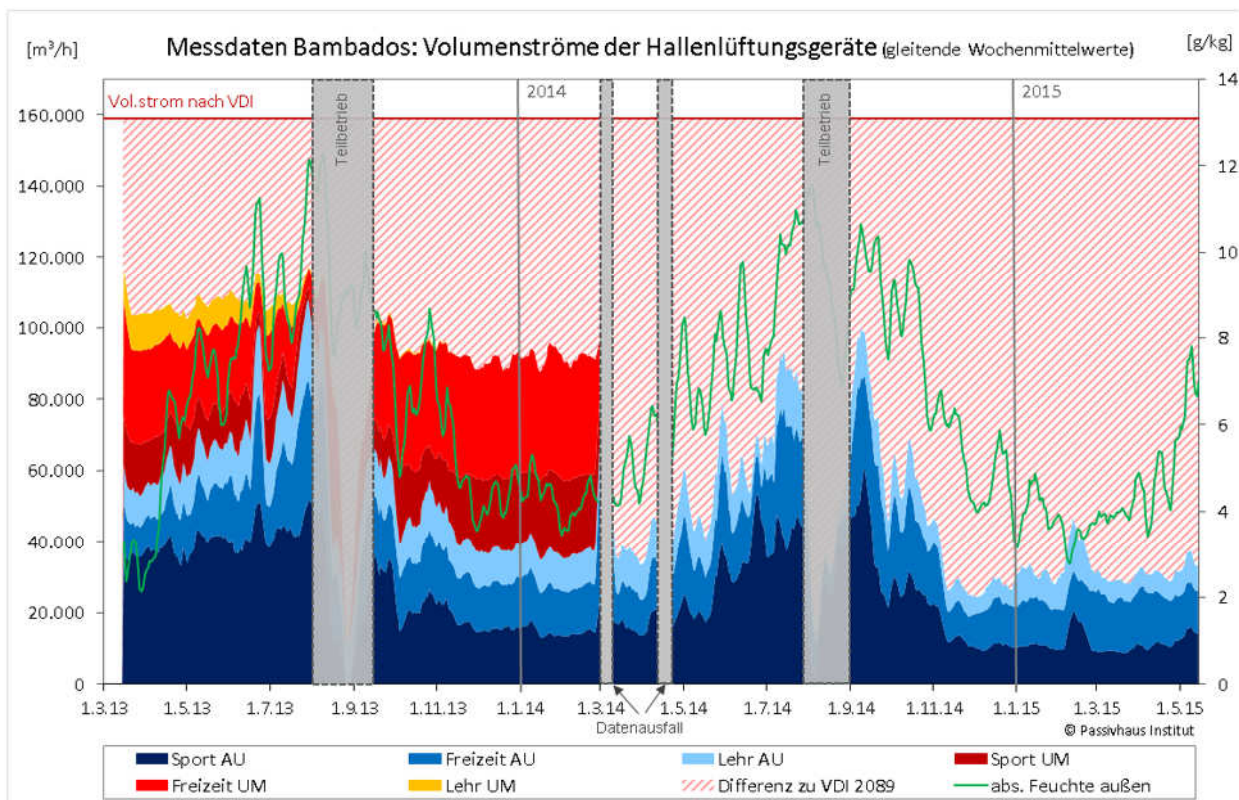


Abbildung 75: Volumenströme aller Hallengeräte (AU= Außenluft, UM = Umluft)

In Abbildung 74 ist ein deutlicher Rückgang des Stromverbrauchs für die Hallenlüftung zu sehen. Dies wurde durch die Optimierung der Lüftungsregelung erreicht. Die relevantesten Änderungen waren der Nachtbetrieb (Lüftungsgeräte ausgeschaltet, aber mit Feuchteüberwachung) und der Betrieb ohne Umluftvolumenstrom. Abbildung 75 zeigt, wie der Volumenstrom der Hallengeräte reduziert werden konnte. Der Jahresstromverbrauch für die Hallenlüftung konnte damit im angezeigten Zeitraum um über 60 % gesenkt werden (Verbräuche: August 2012 bis Juli 2013: ca. 400 MWh; Mai 2014 bis April 2015 ca. 150 MWh).

Die durchschnittlichen Luftwechsel (Tag- und Nachtbetrieb zusammen) wurden für den Zeitraum 1.5.2014 bis 1.5.2015 ausgewertet:

- Halle Freizeit-/Eltern-Kind-Becken: 1,5-facher Luftwechsel
- Halle Sportbecken und Rutschenbereich: 1,3-facher Luftwechsel
- Halle Lehrbecken: 4,0-facher Luftwechsel

Die Unterschiede im Luftwechsel ergeben sich u.a. durch die unterschiedlichen Raumhöhen. Die Hallen Freizeit und Sport sind mehr als doppelt so hoch wie der Lehrschwimmbereich.

In Abbildung 75 ist außerdem in grau dargestellt, welcher Volumenstrom bei einer Betriebsweise nach [VDI 2089] zusätzlich gefördert werden müsste.

5.7.4 Umluft „Heizen“

In der Planungsphase wurde davon ausgegangen, dass es gewisse Stunden gibt, in denen zusätzlich Umluft gefahren werden muss, um die notwendige Heizleistung in die Halle bringen zu können (siehe Betriebsweise a' in Abbildung 70). Das Monitoring zeigt, dass dies in allen Hallenbereichen nicht notwendig war. Exemplarisch ist dies anhand des Lüftungsgerätes Lehrschwimmbecken in Abbildung 76 dargestellt. Zu Beginn der Messzeit ist die Klappe „Umluft Heizen“ aufgrund von Standardeinstellungen des Gerätes häufig offen. Nachdem ab Herbst 2013 die Betriebsweise an das geplante Konzept (u.a. ohne Umluft) angepasst werden konnte, gibt es keine weitere Anforderung, dass zusätzliche Umluft zur Deckung der Heizlast benötigt wird.

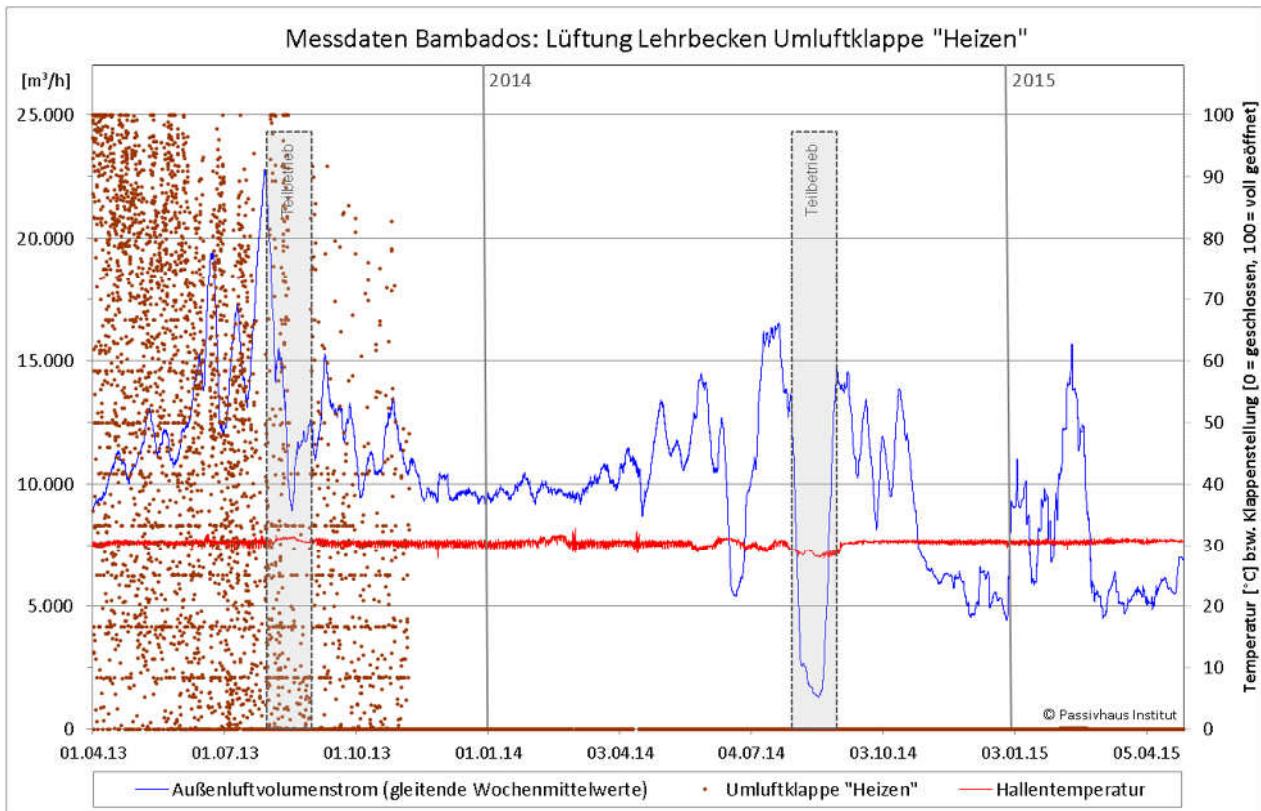


Abbildung 76: Lüftungsgerät Lehrschwimmbecken: Ab Herbst 2013 läuft das Gerät nach oben beschriebenem Konzept und es zeigt sich, dass keine zusätzliche Umluft erforderlich ist, um die benötigte Heizleistung decken zu können (die Umluftklappe „Heizen“ bleibt durchgehend geschlossen).

5.7.5 Verdunstung und Entfeuchtung

Die Entfeuchtungsleistung ist von Interesse, da sie Rückschlüsse über den Feuchteeintrag in die Halle erlaubt (hauptsächlich durch Verdunstung). Mit Hilfe von Sensoren in den Lüftungsgeräten kann die Entfeuchtungsleistung wie folgt berechnet werden:

$$\text{Entfeuchtungsleistung [kg/h]} = x_{AB} \cdot \dot{V}_{AB} - x_{ZU} \cdot \dot{V}_{ZU}$$

mit

x_{AB} : Wasseranteil in Abluft $\dot{V}_{AB}$: Abluftvolumenstrom

x_{ZU} : Wasseranteil in Zuluft $\dot{V}_{ZU}$: Zuluftvolumenstrom

In den folgenden Diagrammen sind die Entfeuchtungsleistungen über einen längeren Zeitraum zusammen mit den Raumluftkonditionen der Halle und den Lüftungsvolumenströmen dargestellt.

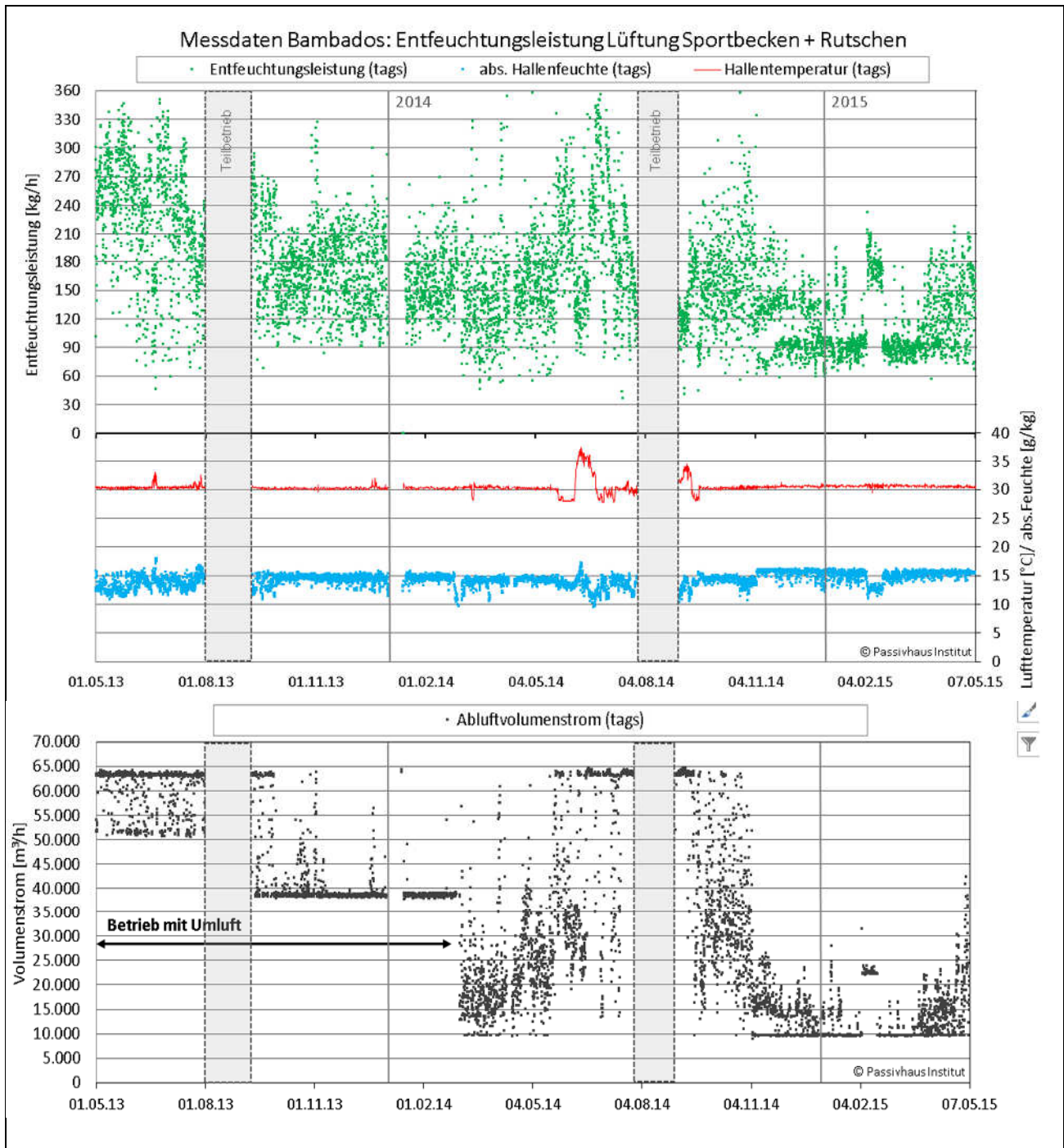


Abbildung 77: Entfeuchtung durch Lüftungsgeräte Sport + Rutschen (tags: von 9-21 Uhr)

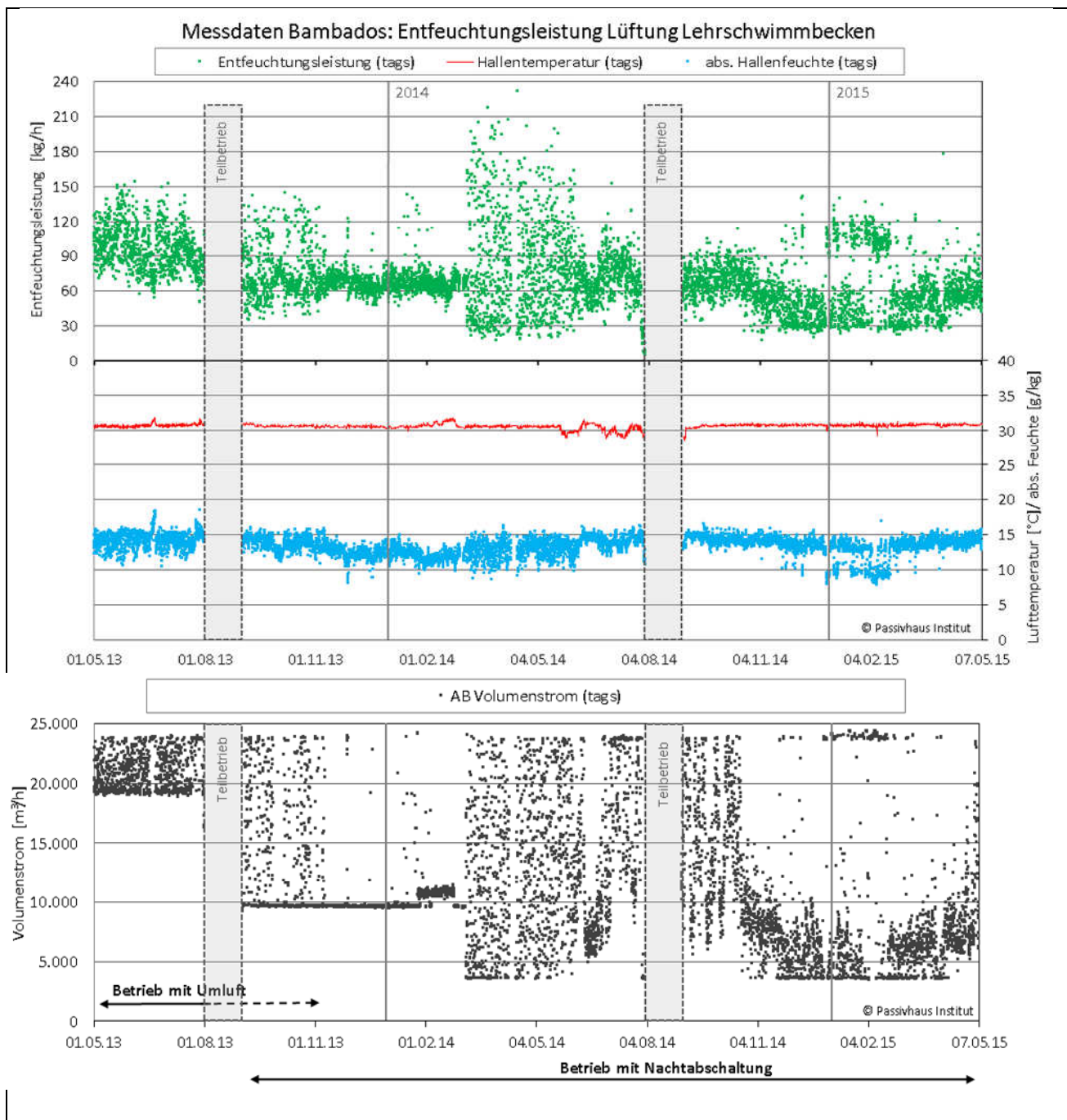


Abbildung 78: Entfeuchtung durch Lüftungsgerät Lehrschwimmbecken (tags: von 9-21 Uhr)

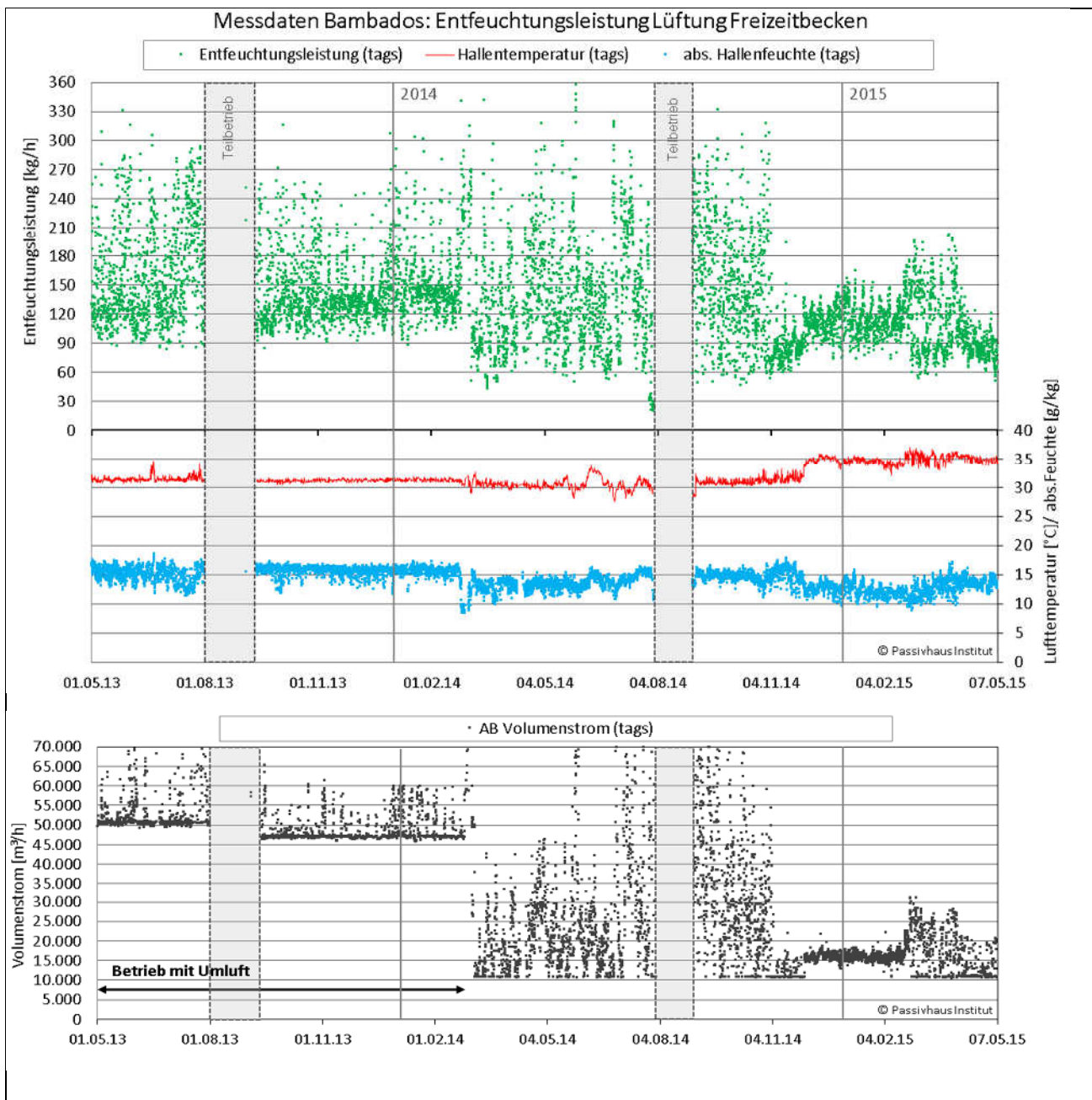


Abbildung 79: Entfeuchtung durch Lüftungsgeräte Freizeit (tagsüber: von 9-21 Uhr)

In Phasen, in denen die Entfeuchtungsleistung der Lüftungsgeräte nicht dazu führt, dass sich die Feuchte in der Halle verändert, entspricht die Entfeuchtungsleistung in etwa der Verdunstung (aus dem Becken und auf den Umgängen bzw. von Personen). Wertet man die Entfeuchtung über einen längeren Zeitraum aus, in dem die Hallenfeuchte am Ende nicht höher ist als anfangs, kann über die durchschnittliche Entfeuchtungsleistung eine durchschnittliche Verdunstungsmenge und damit ein durchschnittlicher Wasserübergangskoeffizient β abgeschätzt werden. Da die Abluftsensoren in den Lüftungsgeräten nur bei deren Betrieb zur Auswertung herangezogen werden können, basiert die Berechnung ausschließlich auf Tagwerten. Dennoch kann auf diesem Weg die Größenordnung der Verdunstung tagsüber abgebildet werden. Dies kann hilfreich zur Berechnung der Energiebilanz bzw. der Betriebskosten sein.

In der folgenden Tabelle werden die Planungswerte aus der [VDI 2089] den Werten aus der Praxis gegenüber gestellt (Werte für Betriebsstunden (9-21 Uhr), außer Sommerpause im August; Zeitraum: Freizeitbereich: 12.9.13 bis 30.4.15; Lehrbereich: 1.9.13 bis 30.4.15; Sportbereich: 9.9.13 bis 14.2.15)

Tabelle 9: Planungs- und Messwerte von Wasserübergangskoeffizienten und Entfeuchtungsleistung (Tagwerte: 9-21 Uhr)

Hallenbereich	β nach [VDI 2089]	β (gemessen)	Entfeuchtungsleistung inkl. Attraktionen (gemessen)
Freizeit- und Eltern-Kind-Becken	40 + Attraktionen	ca. 10	ca. 0,32 kg/h/m ² WF*
Lehrschwimmbecken	40	ca. 14	ca. 0,26 kg/h/m ² WF
Sportbecken und Rutschen	28 + Rutschen	ca. 15	ca. 0,15 kg/h/m ² WF*
*) Die Entfeuchtungsleistung ist auf die Wasserfläche (WF) bezogen, enthält aber auch Entfeuchtung aufgrund von erhöhter Verdunstung durch Attraktionen bzw. Rutschen.			

Abbildung 80 zeigt eine kürzere Periode des Sport- und Rutschenbereichs. Aufgrund eines Fehlers nach der Wartung blieb der Volumenstrom eines Lüftungsgerätes einige Tage erhöht. Als Folge davon sank die absolute Feuchte in der Halle, womit die Verdunstung bzw. der Entfeuchtungsbedarf stieg. Dies ist deutlich im Diagramm zu erkennen. Während für diesen Zeitraum der Heizwärmebedarf für die Hallenluft deutlich steigt (siehe Abbildung 15), ist im Heizwärmebedarf des Beckens keine Auswirkung abzulesen. Dies mag an dem generell sehr geringen Heizwärmebedarf des Beckens liegen. Der Wärmeverbrauch zur Beheizung der Halle steigt in diesem Zeitraum auf ca. das Doppelte (von ca. 800 kWh/d auf ca. 1.600 kWh/d).

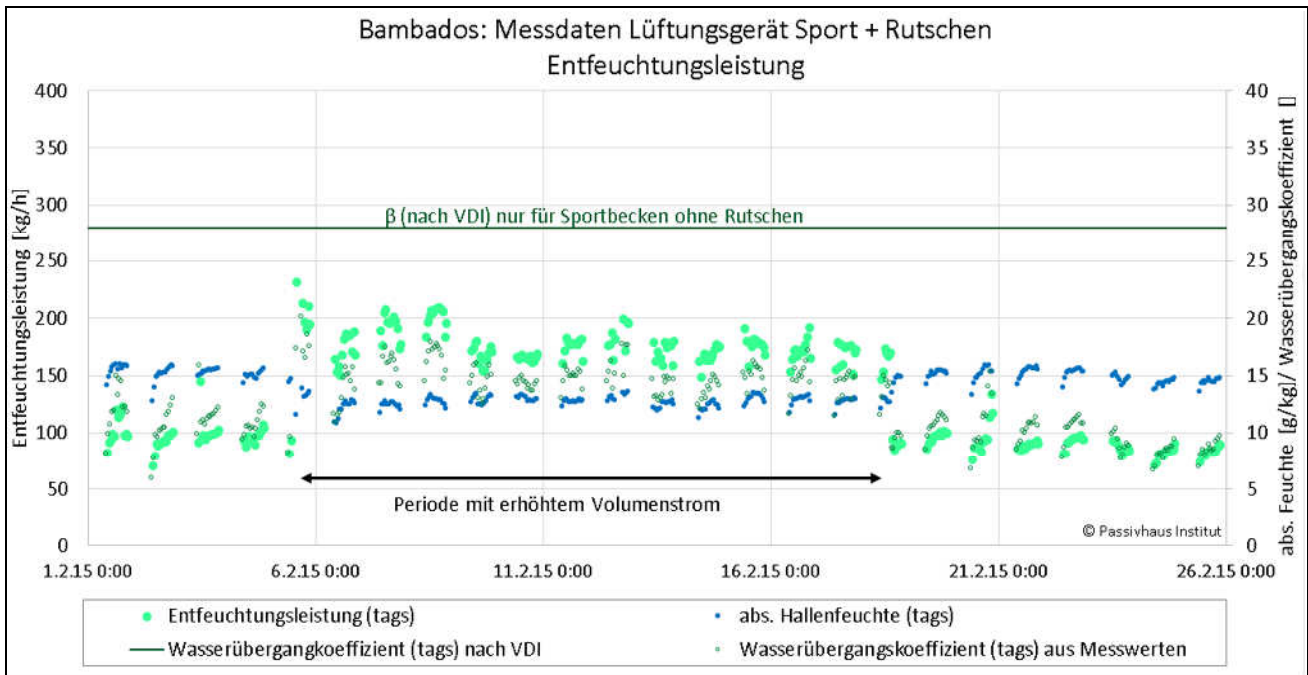


Abbildung 80: Lüftungsgerät Sport: Durch einen erhöhten Volumenstrom (Fehler nach Wartung) erhöht sich die Entfeuchtung bzw. Verdunstung (Dargestellt sind nur die Werte zwischen 9 und 21 Uhr)

5.7.6 Auslegung der Lüftungsgeräte

Wenn die mittlere Verdunstung und Entfeuchtungsleistung so viel geringer ist als die Auslegungsplanung nach [VDI 2089], stellt sich die Frage, ob für zukünftige Projekte sogar kleinere Lüftungsgeräte gewählt werden können. Schaut man sich die Messdaten im Detail an, so ist festzustellen, dass im Sommer jedoch öfter Spitzenvolumenströme (einzelne Spitzen, aber auch mehrere Tage) gefahren wurden, d.h. die Geräte liefen mit Nennvolumenstrom. Dafür gibt es drei Ursachen:

- Die [VDI 2089] sieht vor, dass die Lüftungsgeräte nur bis zu einer maximalen Außenluftfeuchte von 9 g/kg die notwendige Entfeuchtungsleistung bringen müssen. Aufgrund der geringen Verdunstung kann im Bambados auch in Zeiten höherer Außenluftfeuchten (über mehrere Wochen) der Feuchtesollwert eingehalten werden (siehe Abbildung 81).
- Die Messdaten weisen darauf hin, dass Spitzenvolumenströme teilweise aufgrund einer (unnötigen?) Kühlanforderung gefahren werden. Die Kühlanforderung wurde unserer Meinung nach mit zu kleiner Differenz zur Heizanforderung programmiert. Versuche, ab welchen Innentemperaturen eine Kühlung seitens des Personals oder der Gäste erwünscht oder ob eine Kühlung überhaupt notwendig ist, können allerdings nur zusammen mit den Programmierern des Geräteherstellers gefahren werden. Weiter Untersuchungen wären hier wünschenswert.
- Die in der Programmierung implementierten Regelparameter sind so flink eingestellt, dass sehr stark schwankende Volumenströme und damit auch Spitzenvolumenströme gefahren

werden. Hier könnte der Betrieb mithilfe trägerer Regelparameter noch weiter optimiert werden.

Eine unmittelbare Empfehlung zu kleineren Geräten kann aus den bisherigen Messergebnissen nicht gezogen werden. Es besteht aber die Möglichkeit mit weiterer Forschung in Zukunft die Lüftungsgeräte für Schwimmhallen etwas kleiner dimensionieren zu können.

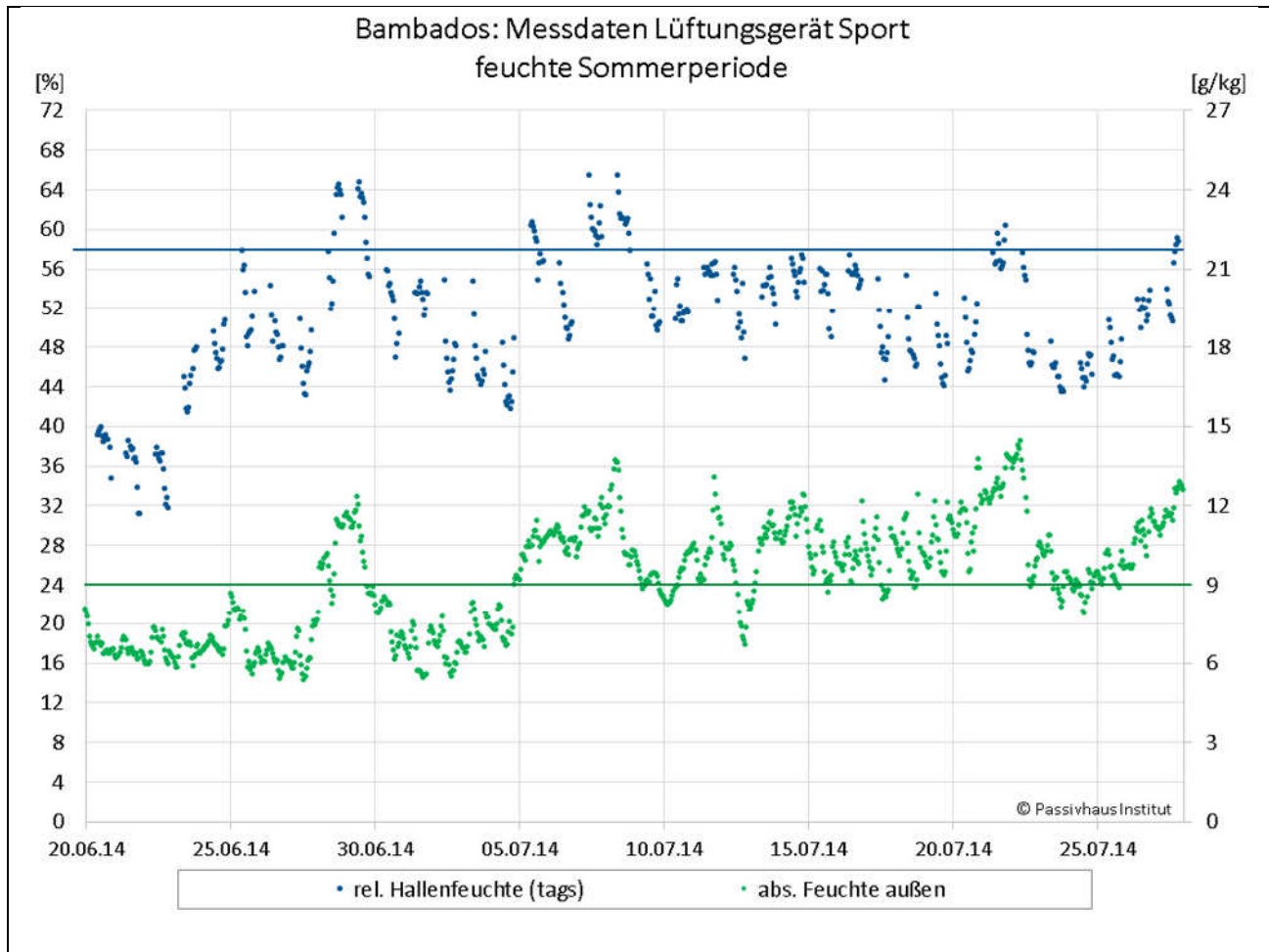


Abbildung 81: Lüftungsgerät Sport: Sogar in der feuchten Sommerperiode (über 9 g/kg abs. Feuchte außen) kann überwiegend der Sollwert von 58 % relativer Feuchte in der Halle eingehalten werden.

5.7.7 Nachtbetrieb

Laut Konzept sollten die Lüftungsgeräte nachts ausgeschaltet werden, solange die Hallenluft trocken genug ist. Interessanter Aspekt des Monitorings war, im Betrieb zu sehen, wie häufig eine Entfeuchtung nachts notwendig ist. Ergebnis ist, dass die drei verschiedenen Lüftungsbereiche sich sehr unterschiedlich verhalten.

Im Bereich der Lehrbecken mit niedrigen Raumhöhen springt das Lüftungsgerät regelmäßig, kurz und mit hohem Volumenstrom an. Dies zeigt, dass ein gewisser Entfeuchtungsbedarf besteht, aber nicht durchgehend während der Nacht und zu allen Jahreszeiten. Wünschenswert wäre eine Optimierung in Form von trägeren Reglern, sodass der Volumenstrom weniger stark schwankt, sondern mit

geringerem Volumenstrom über eine längere Zeit gefahren wird. Dies wurde jedoch vom Gerätehersteller nicht umgesetzt.

Im Bereich Freizeitbecken schaltet das Gerät nachts meistens aus und wird durch einen Entfeuchtungsbedarf zu unterschiedlichen Nachtzeiten angefordert. Anschließend fährt das Lüftungsgerät mit minimalem Volumenstrom so lange, bis die Luftfeuchtigkeit entsprechend gesunken ist.

Im Bereich Sportbecken läuft das Gerät dagegen meistens nachts durch und die Feuchte der Halle steigt sogar. Um diesen Ablauf zu verstehen, wurde im März 2015 eine Versuchsreihe gefahren. Die Messergebnisse sind in Abbildung 82 dargestellt.

- Referenz-Nacht (16./17.3.15): Regulärer Betrieb: Lüftungsgerät Sport läuft nachts durch und die Hallenfeuchte steigt auf den Grenzwert an. Das Lüftungsgerät Freizeit schaltet sich zeitweise aus. Das Lüftungsgerät Umkleiden/Duschen ist bis auf kurze Intervallschaltung zur Überprüfung der Feuchte aus.
- 1. Nacht (17./18.3.15): Das Lüftungsgerät Freizeit wurde testweise die ganze Nacht betrieben, sodass sich dort eine geringere Feuchte einstellt. Als Folge davon ist im Sportbereich die Feuchte geringer als die Nächte zuvor und es wird ein geringerer Volumenstrom aufgrund von geringerem Entfeuchtungsbedarf gefahren.
- 2. Nacht (18./19.3.15): Sowohl das Lüftungsgerät Freizeit als auch das Lüftungsgerät der Umkleiden/Duschen wurde testweise die ganze Nacht betrieben. Auch in dieser Nacht sind im Sportbereich eine geringere Feuchte und ein geringerer Volumenstrom zu sehen. Allerdings keine Veränderung zur 1. Nacht, die eine Abhängigkeit zur Zone Umkleiden/Duschen nahelegen würde.

Der Versuch hat gezeigt, dass vermutlich das Lüftungsgerät Sport im regulären Nachtbetrieb auch die Hallenluft des Freizeitbereichs mit entfeuchtet, obwohl die Türen zwischen den beiden Bereichen (Sport/Rutschen zu Freizeit) geschlossen sind.

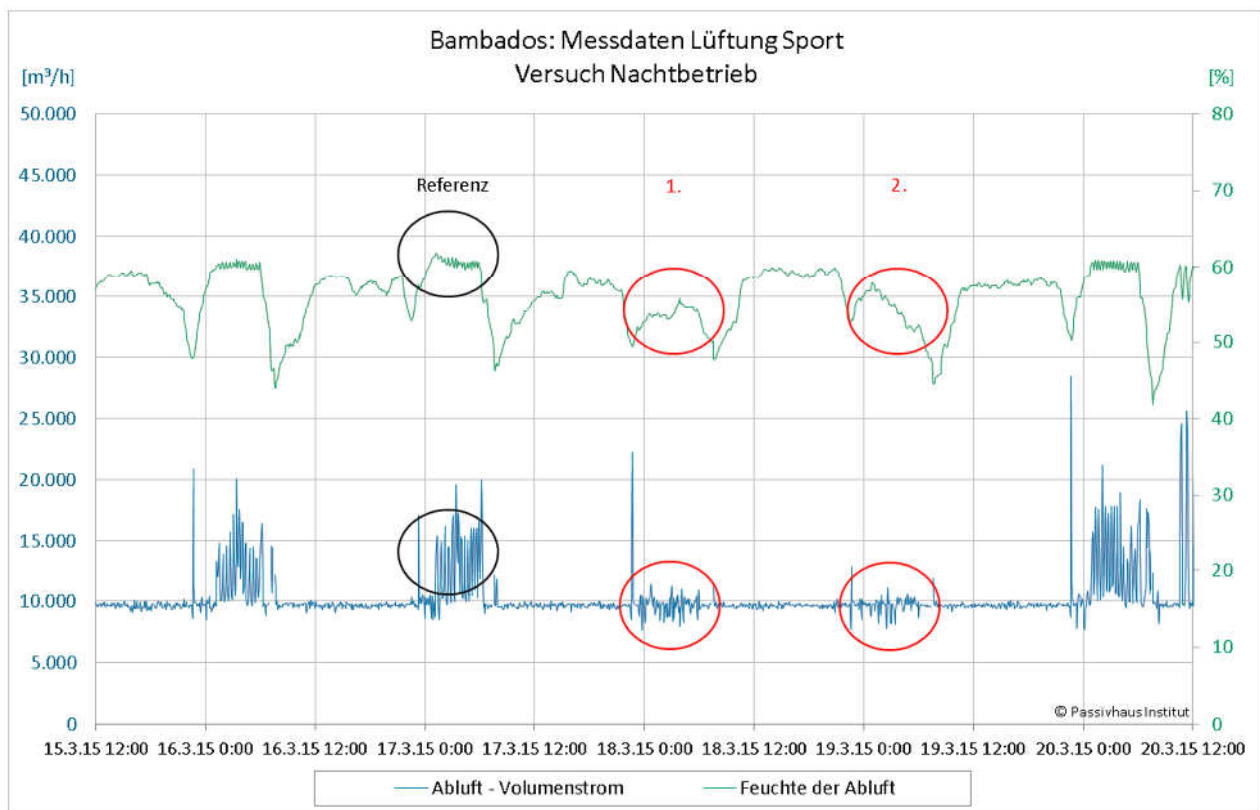


Abbildung 82: Lüftungsgerät Sport: Versuch zur Abhängigkeit mit der Zone Freizeit und Umkleiden/Duschen

5.7.8 Wärmepumpen

In der Abluft der Hallen steckt viel Energie, da die Temperatur und der Feuchtegehalt hoch sind. Um diese sensible und latente Energie zurückzugewinnen, wurden zum einen Lüftungsgeräte mit „passivem“ Wärmetauscher und zum anderen Fortluftwärmepumpen in den Lüftungsgeräten für die Schwimmhallen eingesetzt. Der Abluft wird im ersten Schritt im Wärmetauscher Energie entzogen und im zweiten Schritt durch den Verdampfer der Wärmepumpe. Im Betrieb hat sich gezeigt, dass sehr wenig Entfeuchtungsbedarf besteht. Dies ist vorteilhaft, da dadurch Energie eingespart werden kann. Die Konsequenz ist allerdings, dass die installierten Wärmepumpen zu groß sind. Sie benötigen einen Mindestvolumenstrom von 30 % bezogen auf den Nennvolumenstrom. Da während des größten Teils des Jahres der Volumenstrom geringer ist, können die Wärmepumpen nicht laufen. Es wäre kontraproduktiv den Volumenstrom zu erhöhen, um die Wärmepumpen zum Einsatz zu bringen. Für den Zeitraum von August 2013 bis Mai 2015 wurden die Messdaten der Lüftungsgeräte ohne den Betrieb der Wärmepumpen ausgewertet. Mit steigender Außenluftfeuchte wurden ab Mitte Mai die Wärmepumpen eingeschaltet. Es zeigt sich schnell, dass auch im Sommer die Wärmepumpen im Bambados nicht gewinnbringend genutzt werden können. Dies hat drei Gründe:

- Der geringe Entfeuchtungsbedarf führt zu niedrigen Volumenströmen. Sogar im Sommer mit höheren Außenluftfeuchten liegt der Volumenstrom oft unterhalb der 30 %.
- Im Sommer liegt vor allem im Sportbereich nicht immer durchgehend Heizwärmebedarf vor.

- Die Regelung der Lüftungsgeräte (Höhe der Volumenströme) ist vor allem im Freizeit- und Lehrbereich sehr stark schwankend. Eine Optimierung der Regelung wäre sinnvoll.

Für zukünftige Projekte sollten Wärmepumpen für niedrigere Volumenströme dimensioniert werden. Außerdem ist zu beachten, dass Wärmepumpen mit anderer Energieerzeugung konkurrieren. Im Bambados wird ein BHKW betrieben, dass in den Sommermonaten abgeschaltet werden musste, da die Wärmeabnahme des gesamten Bades so gering ausfällt.

5.7.9 Empfehlungen zur Hallenlüftung

- Variierenden Außenluftvolumenstrom nach Entfeuchtungsbedarf fahren.
- Kein Umluftvolumenstrom.
- Gute Luftdurchströmung (weiterer Forschungsbedarf): Im Bambados könnte die Luftdurchströmung im Sportbereich optimiert werden, indem bereits in den aufsteigenden Schächten Abluftgitter montiert werden, sodass die Abluft nicht an der Decke sondern im unteren Bereich der Halle abgeführt wird. [Kaluza 2014]
- Sommerfall: Grenzwert für erhöhten Volumenstrom zum „Kühlen“ so hoch wie möglich setzen.
- Luftfeuchten und Temperaturen im Betrieb testen, um das Optimum zu erhalten.
- Ist ein BHKW geplant, sollte dessen Optimierungspotential ausgeschöpft werden, bevor ein Betrieb von Wärmepumpen in Erwägung gezogen wird.

5.8 Lüftung Nebenzonen

Grundsäule des Passivhauskonzeptes ist es, den hygienischen notwendigen Luftwechsel über ein Lüftungsgerät mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung ($WRG > 75\%$) sicherzustellen. Außer zur Entfeuchtung gibt es keinen Grund in einem Passivhaus höhere Luftwechsel als hygienisch notwendig einzubringen. Die Auslegungsvolumenströme nach den gängigen Normen sind im Vergleich dazu relativ hoch. Durch eine bedarfsgesteuerte Regelung (hinsichtlich Hygiene und Feuchte) kann auch in den Nebenräumen eines Hallenbades der Heizenergie- und Strombedarf signifikant gesenkt werden. Aufgrund der guten Gebäudehülle sinken die Temperaturen bei einer Heizunterbrechung nur langsam. Deswegen können die Lüftungsgeräte weitestgehend intermittierend betrieben werden, d.h. sie werden nachts ausgeschaltet und morgens werden die Räume in einer Vorspülphase mit Frischluft durchspült.

Tabelle 10: Lüftungsgeräte der Nebenzonen mit Luftvolumenströmen und Regelungskonzept

Nr.	Lüftungsgerät	Nennvolumenstr. [m³/h]	Min. Volumenstr. [m³/h] [% von Nenn]		Regelung
2.1	Umkleiden / Duschen EG	16.000	9.600	60 %	nach relativer Feuchte
4.2	Umkleiden / Duschen OG (Sauna)	9.500	5.700	60 %	nach relativer Feuchte
2.2	Foyer / Verwaltung	10.000	3.752	38 %	nach konstantem Druck; in Foyer nach CO ₂ ; Personalduschen nach Feuchte; Rest konstant; (mittels Zuluftklappen)
2.3	Lager / Technik	4.880	1.500	31 %	nach Temperatur
3.1 / 3.2	Küche / Nebenträume	10.600	2.580	24 %	nach Volumenstrom des Küchenabzugs
4.1	Sauna EG/OG	13.650	9.500	70 %	konstanter Volumenstrom

5.8.1 Duschen / Umkleiden

Für den Bereich der Duschen und Umkleiden gibt zwei Lüftungsgeräte, eines für das Erdgeschoss, das andere für das Obergeschoss. In beiden Geschossen wird die Zuluft in die Umkleiden eingebracht. Von dort strömt sie über Überströmelemente und unter Türen in die Räume mit Duschen und WCs und wird dort über Abluftventile abgeführt. Diese doppelte Nutzung des Volumenstroms verringert die Lüftungsverluste und den Stromverbrauch. Da die Nutzung der Umkleiden mit denen der Duschen korreliert, kann der Volumenstrom gemeinsam geregelt werden. Ein Mindestvolumenstrom von 60 % des Auslegungsvolumenstroms sorgt für einen kontinuierlichen Luftaustausch. Zusätzlich wird je nach Feuchte in den Duschen der Volumenstrom erhöht. Für diese Regelung wurden Feuchtesensoren in den zwei Abluftkanälen der Lüftungsgeräte installiert, womit man einen Richtwert für die Raumfeuchten erhält. Zu erwarten war eine jahreszeitliche Schwankung bedingt durch höhere Außenluftfeuchten im Sommerhalbjahr (also höhere Volumenströme im Sommer). Die Lüftungsgeräte werden nachts ausgeschaltet. Um dennoch die Feuchte nachts zu überwachen, wird einmal pro Stunde das Gerät kurz eingeschaltet und der Wert des Feuchtesensors im Kanal überprüft (siehe Abbildung 83).

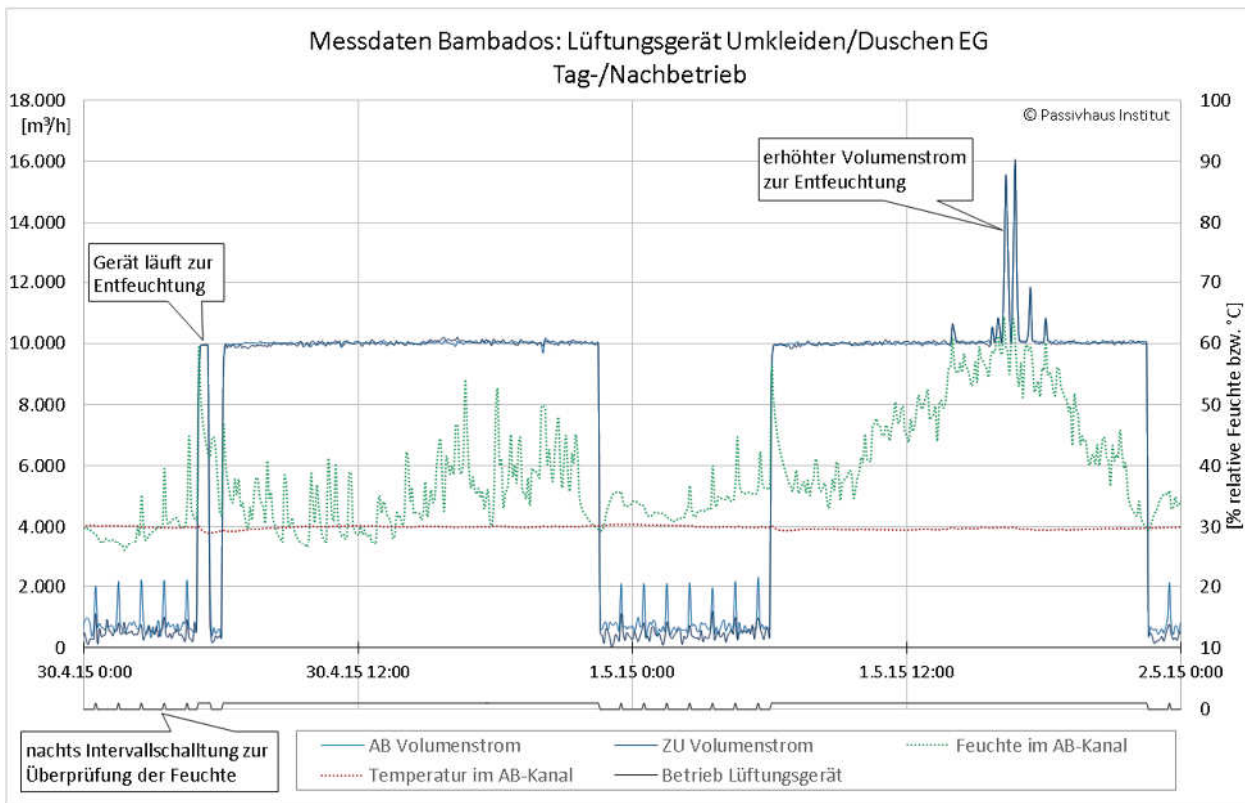


Abbildung 83: Lüftungsgerät Umkleiden EG: Tag- und Nachbetrieb. Dargestellt sind gemessener Zu- und Abluftvolumenstrom sowie die Lufttemperatur und -feuchte im Abluftkanal.

Entfeuchtung

Die Praxis zeigt, dass der Entfeuchtungsbedarf fast ganzjährig unterhalb der Entfeuchtung durch den gewählten Mindestvolumenstrom liegt.

Für das Lüftungsgerät, das die Umkleiden und Duschen für den Schwimmbadbereich (im EG) versorgt, konnte eine genaue Auswertung des Volumenstroms über zwei Jahreszeiträume (1.4.2013 bis 1.4.2015) gemacht werden. Wie Abbildung 84 zeigt, wird nur sehr selten und nur im Sommer eine Volumenstromerhöhung angefordert und gefahren. Die Messergebnisse zeigen, dass tagsüber zu 99 % der gewählte Mindestvolumenstrom gefahren wird und nur 1 % der Tagstunden mit einem erhöhten Volumenstrom. Zu 8 % der Nachtstunden läuft das Gerät, ansonsten ist es ausgeschaltet. Insgesamt konnte der Volumenstrom um mehr als die Hälfte gegenüber der Planung von 16.000 m³/h (Planungswert ohne Passivhausberatung) reduziert werden.

Die Betriebsweise des Lüftungsgeräts für die Saunaumkleiden (im OG) konnte nicht so detailliert ausgewertet werden, da die Regelung des Gerätes nicht entsprechend lange im geplanten Betrieb lief.

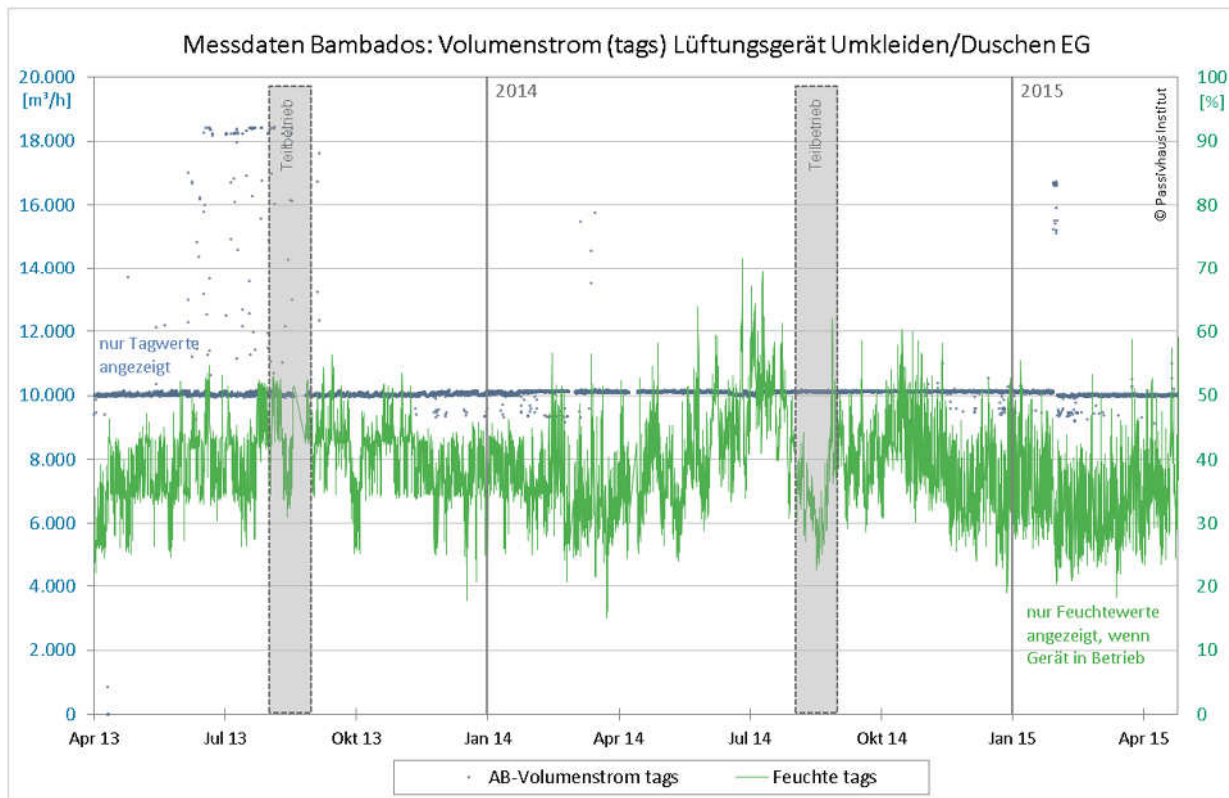


Abbildung 84: Überblick Lüftungsgerät Umkleiden EG: Fast durchgehend läuft das Gerät auf minimalem Volumenstrom und die relative Luftfeuchte ist überwiegend niedriger als 50 %.

Volumenstromvergleich

Zum Vergleich des Luftwechsels je nach Nutzung sind die relevanten Werte in folgende Tabelle eingetragen.

Tabelle 11: Vergleich von Luftwechseln je nach Nutzung (Richtlinie, Planung und Messwerte)

Bereich	nach [KOK 2002]	Ermittlung durch das Planungsbüro	Regelung nach Bedarf: Messwerte
Umkleiden	15 – 20 m³/h je m²	6-7-facher LW	EG: ca. 2,1-facher LW OG: ca. 3,5-facher LW*)
Duschen	220m³/h je Dusche, max. 30-facher LW	30-facher LW	EG: ca. 9,3-facher LW OG: ca. 8,2-facher LW
WCs	100m³/h je WC, max. 15-facherLW	15-facher LW	
LW = Luftwechsel			
*) Dieser LW ist weniger aussagekräftig als der LW im Erdgeschoss, da im Obergeschoss nicht nur Umkleiden sondern auch Treppenhäuser und WCs in der Berechnung enthalten sind.			

Deutlich erkennbar ist, dass die angegebenen Planungswerte sehr weit auf der sicheren Seite liegen. Ein Betrieb nach diesen erfordert unnötig hohe Betriebskosten (Strom für den Betrieb des Lüftungsgerätes und zusätzlich Heizenergiebedarf wegen höheren Lüftungsverlusten). Im Bambados konnte gezeigt werden, dass mit einem Mindestvolumenstrom von 60 % die relative Luftfeuchte um die 40 % rF liegt. Weiterhin sind die Betreiber und Gäste mit der Luftqualität in den Umkleiden und Duschen zufrieden. Einzige Kritik gab es anfangs an der Temperatur in den Umkleiden im Erdgeschoss, was durch eine Erhöhung des Temperatursollwerts beseitigt wurde. Aufgrund des Raumluftverbundes zum Foyer wird kontinuierlich Energie an das Foyer abgegeben, weshalb in den Umkleiden mehr geheizt werden muss. Im Gegensatz dazu laufen die Umkleiden des Obergeschosses, die zum Foyer hin abgeschlossen sind, mit der ursprünglichen Solltemperatur. Für das Gerät Umkleiden OG wurde zunächst häufig die sommerliche Nachtkühlung angefordert. Die Praxis zeigte aber, dass für die Zonen beider Geräte kein Kühlbedarf besteht. Aus diesem Grund wurde die Nachtkühlung auf der GLT deaktiviert.

Empfehlungen Lüftung Duschen und Umkleiden

- Weder Nachheizregister noch aktive Überströmung zwischen Umkleiden und Duschen sind notwendig.
- Volumenstrom reduzieren (siehe oben) und nach tatsächlichem Bedarf regeln (z.B. über Feuchtesensor im Kanal).
- Da der Entfeuchtungsbedarf gering ist, wäre es interessant, noch genauer zu untersuchen, wie groß der hygienische Luftbedarf ist. Ließe sich der Mindestvolumenstrom noch weiter senken, würde der Heizenergie- und Stromverbrauch sinken.
- In der Betriebsoptimierung könnte das Lüftungsintervall nachts angepasst werden, z.B. nur noch alle zwei Stunden. Alternativ dazu könnten bei zukünftigen Projekten der Einsatz von Feuchtesensoren in kritischen Ablufträumen zur Feuchteüberwachung in Erwägung gezogen werden.

5.8.2 Foyer / Verwaltung

Mit dem Lüftungsgerät Foyer / Verwaltung werden einerseits Büroräume, andererseits das große Foyer versorgt. Während sich für Büroräume normalerweise keine bedarfsgerechte Lüftung lohnt, unterliegt der Frischluftbedarf aufgrund wechselnder Besucherzahlen im Foyer großen Schwankungen. Es war zu vermuten, dass sich im Foyer nie so viele Leute aufhalten werden, wie für die Volumenstromauslegung seitens der Planer angesetzt wurden. Aus diesem Grund wurde ein CO₂-Sensor im Foyer installiert. Dieser Sensor regelt Klappen, sodass wahlweise zwei oder acht Zuluftventile das Foyer versorgen. Das Lüftungsgerät regelt über eine Druckregelung den Volumenstrom, sodass sich der Volumenstrom in zwei Stufen dem tatsächlichen Bedarf anpassen kann. Bei Verwendung von CO₂-Sensoren ist es wichtig, dass diese regelmäßig kalibriert werden. Von diesem Lüftungsgerät werden außerdem Personalduschen versorgt, die nur sehr geringe Nutzungszeiten haben. Diese Räume wurden mit hygrostatistischen Ventilen ausgestattet, um den Volumenstrom dem Bedarf anzupassen.

Das Gerät wird nachts ausgeschaltet. Die Empfehlungen einer thermischen Trennung zur Saunazone und einer Abgrenzung (Wand, Verglasung o.ä.) zur Umkleide wurden nicht umgesetzt, was zu einem (erhöhten) Bedarf einer Nachtkühlung im Sommer führte.

Volumenstrom

Im Betrieb bestätigten sich die oben genannten Annahmen und es zeigt sich, dass der CO₂-Wert immer so niedrig (unter 1.000 ppm, größtenteils unter 600 ppm) liegt, dass kein erhöhter Volumenstrom gefahren werden muss. Abbildung 85 zeigt den Betrieb des Lüftungsgerätes Foyer/Verwaltung. Dieser ist geprägt durch eine lange Phase der Betriebsoptimierung. Im optimierten Zustand (Januar 2015 bis Mai 2015) beträgt der Volumenstrom tagsüber ca. 4.000 m³/h, davon entfallen ca. 2.000 m³/h auf das Foyer. Nach KOK-Richtlinie [KOK 2002] wurde vom Planungsbüro 6.300 m³/h vorgeschlagen (5 m³/h je m³ Raum). Der tatsächlich gefahrene Volumenstrom kann unter verschiedenen Aspekten bewertet werden:

- Bei einem Frischluftbedarf von 20 - 30 m³/h pro Person würde der gefahrene Volumenstrom für 67-100 Personen ausreichen. Der Großteil der Personen wird sich im Foyer nur für eine kurze Wartezeit und nicht kontinuierlich aufhalten. Aus diesem Grund wäre der Volumenstrom sogar für eine höhere Anzahl Personen ausreichend.
- Der gefahrene Volumenstrom entspricht etwa einem 1,3-fachen Luftwechsel im Foyer. Verglichen mit einem 0,3-fachen Luftwechsel zur Abfuhr von Schadstoffen aus Baumaterialien, Möbeln und Putzmitteln ist also die Grundlüftung sichergestellt.
- Alle anderen Räume außer dem Foyer, die von diesem Lüftungsgerät versorgt werden, haben einen durchschnittlichen Luftwechsel von 2,3 h⁻¹. Diese Räume haben sehr unterschiedliche Funktionen (Büro, Flur, ELT-Raum, Umkleide usw.) und damit auch stark differierende Luftwechsel. Insgesamt betrachtet, ist auch dort ein ausreichend hygienischer Luftwechsel gegeben (weit höher als 0,3 h⁻¹).

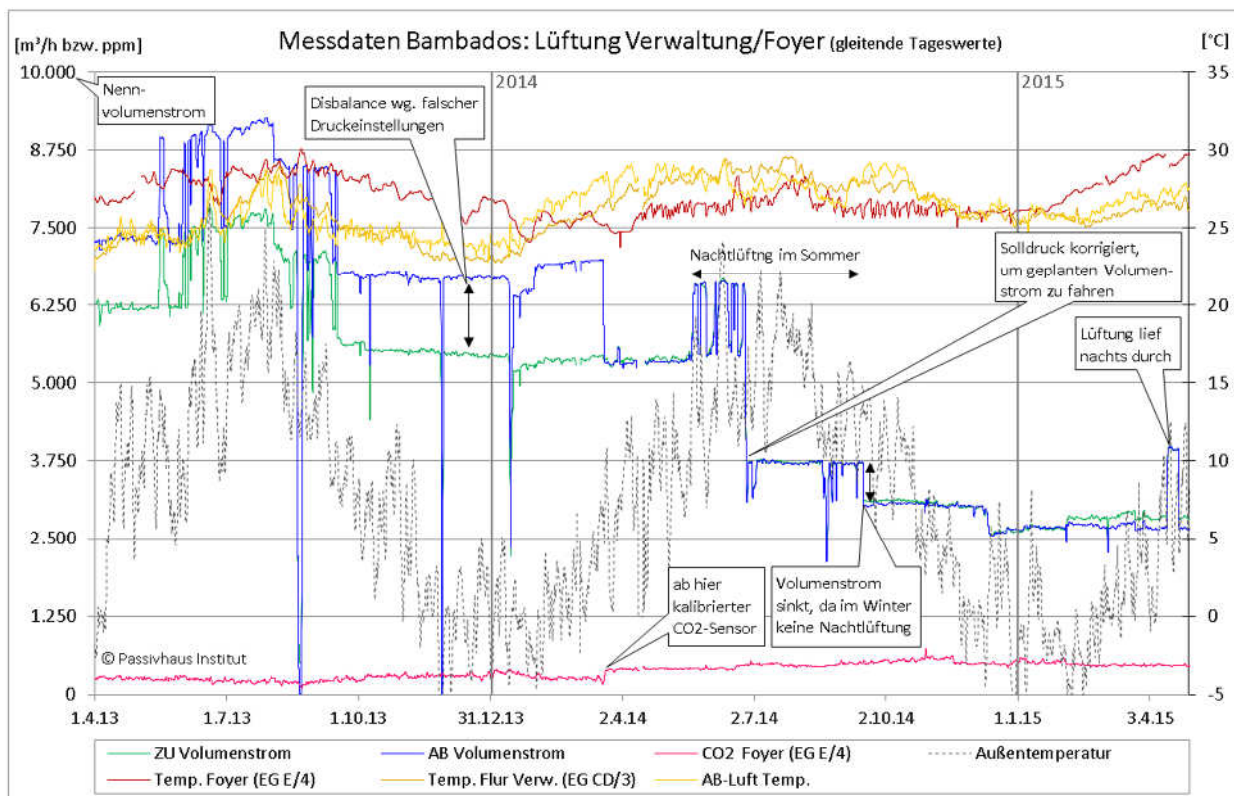


Abbildung 85: Überblick Lüftungsgerät Foyer/Verwaltung: durch Betriebsoptimierung konnte der Volumenstrom erheblich gesenkt werden.

In Abbildung 86 ist deutlich zu erkennen, welchen großen Einfluss eine Betriebsoptimierung auf die Betriebskosten hat. Von ca. 100 kWh Strom pro Tag konnte der Verbrauch auf ca. 20 kWh gesenkt werden. Zusätzlich zu dieser Einsparung sinkt der Wärmeverbrauch, da durch geringere Volumenströme die Lüftungsverluste gesenkt werden. Noch günstiger und wünschenswert wäre eine bessere Inbetriebnahme, sodass die Betriebsoptimierung in kürzerer Zeit erfolgen kann.

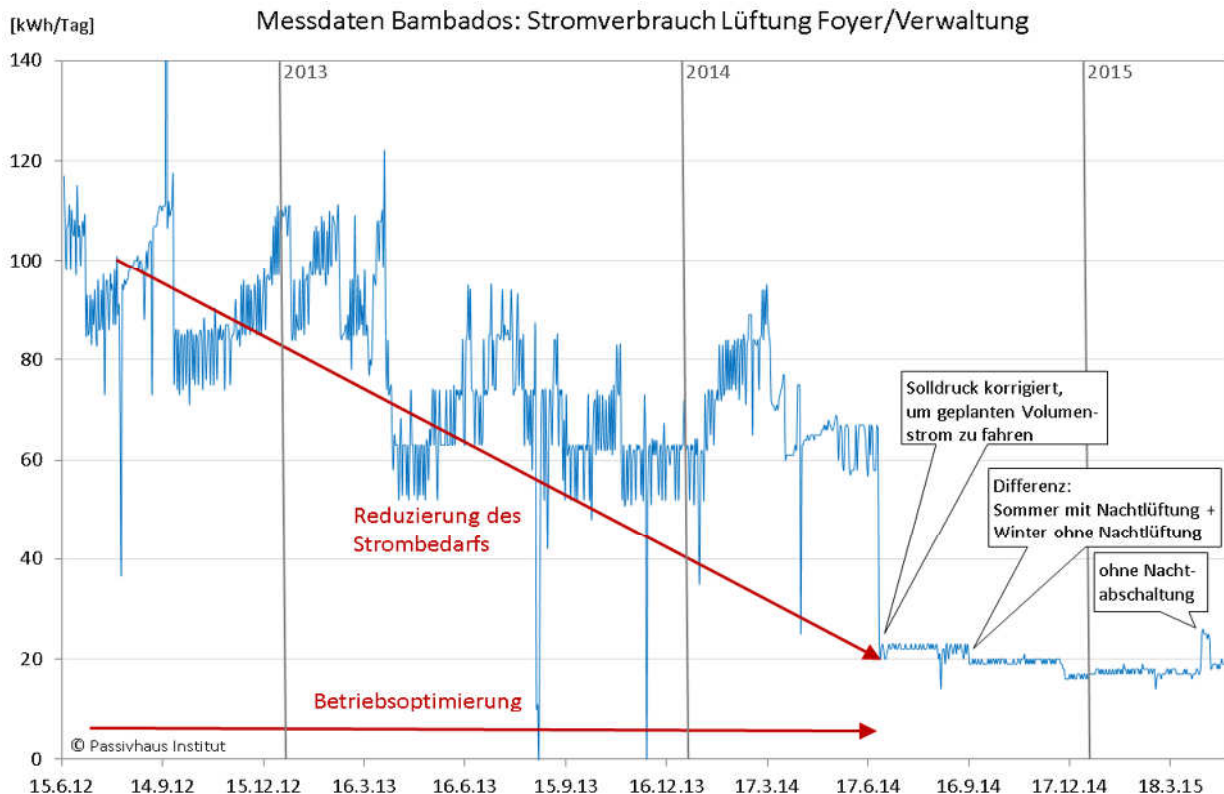


Abbildung 86: Stromverbrauch Lüftungsgerät Foyer/Verwaltung

Nachtbetrieb

Wie in anderen Nichtwohngebäuden wird die Lüftungsanlage intermittierend betrieben. D.h. außerhalb der Betriebszeiten wird kein hygienischer Luftwechsel benötigt und das Lüftungsgerät ist ausgeschaltet. Das Foyer und die Verwaltung werden aus den angrenzenden wärmeren Zonen erwärmt. Dadurch entsteht Kühlbedarf. Neben einer passiven Nachtkühlung über Fenster und Oberlicht wird auch über das Lüftungsgerät gekühlt. Nachts wird im Sommer das Lüftungsgerät temperaturgeregelt eingeschaltet und mit Sommerbypass (Luftstrom nicht über Wärmetauscher) betrieben. Für die Nachtkühlung über das Lüftungsgerät beträgt der Strombedarf etwa 3 bis 4 kWh pro Nacht.

Empfehlungen Lüftung Foyer und Umkleiden

Die Ziele der bedarfsgerechten Lüftung und damit niedrigen Betriebskosten sind erfüllt. Eine bessere Regelung der unterschiedlichen Temperaturen wäre wünschenswert. Für zukünftige Bäder sollten bereits in der Architekturplanung die Weichen gestellt werden. Folgende Empfehlungen lassen sich aus den Erfahrungen im Bambados ableiten.

Büro:

- Thermische Trennung zu warmen Gebäudezonen (hier: Sauna)
- personenbezogener Luftwechsel (20 bis 30 m³/h pro Person) wie in Passivhaus-Bürogebäuden

- Passive Nachtlüftung zur Kühlung (Fenster, Klappen, Oberlichter)

Foyer:

- Kein Raumlufthverbund mit den Umkleiden, da vom Personal niedrigere Temperaturen gewünscht werden als von den Badegästen in den Umkleiden.
- Volumenstrom nach CO₂-Gehalt der Raumlufth regeln
- oder Volumenstrom konstant auf niedrigem Niveau fahren; dadurch könnte die Regelung wesentlich vereinfacht werden und anfällige CO₂-Sensoren wären nicht notwendig.

Personalumkleiden/-duschen:

- Aufgrund der gewünschten Temperatur wäre es günstiger, die Personalumkleiden und -duschen mit dem Lüftungsgerät Umkleiden/Duschen zu versorgen.
- Die verwendeten hygrostatischen Ventile konnten nicht genauer ausgewertet werden.

5.8.3 Lager / Technik

Mehrere Nebenräume im Keller werden durch das Gerät für „Lager und Technik“ versorgt. Erwähnenswert sind zum einen Chemikalienlager, deren Frischluftbedarf nach Vorschrift festgelegt ist, und zum anderen Elektroräume mit internen Wärmequellen. In der Planungsphase konnten die genauen internen Wärmegewinne durch die Technik (Server, ELA etc.) seitens des Elektroplaners nicht genau bestimmt werden. Bei den meisten Projekten fehlt leider die Erfahrung dazu. Könnten diese Werte in der Planungsphase genauer bestimmt werden, könnte ein passendes und effizientes Kühlkonzept geplant werden. Im Bambados zeigt das Monitoring höhere interne Wärmelasten in den Elektroräumen bzw. speziell im ELA-Raum als zunächst angenommen.

Gekühlt wird durch Lüftung mit Sommerbypass und durch Volumenstromerhöhung für das ganze Gerät. Der Strombedarf konnte etwas gesenkt werden, indem durch Optimierung der Regelung vorrangig mit Sommerbypass gekühlt wird. Trotzdem wäre eine weitere Optimierung der Regelung wünschenswert. Ziel ist es, die Laufzeiten mit hohem Volumenstrom weiter zu verkürzen. Momentan gibt es auch Überlegungen eine Kühlung nachzurüsten anstatt, mit erhöhtem Volumenstrom zu fahren.

5.8.4 Küche

Die Küchenräume werden einerseits von einem Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung und andererseits von drei Ablufthauben belüftet bzw. entlüftet. Je nach Stufenschaltung der Ablufthauben wird die Menge der Zuluft angepasst. D.h. das Lüftungsgerät fährt in Disbalance, was unerwünscht ist, da sich dadurch der Wärmebereitstellungsgrad signifikant verschlechtert. Eine Optimierungsmöglichkeit, die seitens des PHI bereits während der Planungsphase empfohlen wurde, wäre die Induktionshauben mit nicht vorerwärmter Außenluft als Zuluft zu betreiben. Dann müssten ca. 5.000 bis 7.000 m³/h Luft weniger erwärmt werden, bei gleichem Komfort in der Küche. Das Lüftungsgerät wird intermittierend betrieben, d.h. es wird nachts ausgeschaltet.

5.8.5 Sauna

Das Lüftungsgerät „Sauna“ bringt Zuluft in die Saunavorräume bzw. Ruheräume ein. Diese strömt unterhalb der Türen in die Saunakabinen und wird dort als Abluft abgesaugt. Im Gegensatz dazu hatte das Passivhaus Institut eine Lüftungstechnische Trennung des Saunavorraums und der Saunakabinen empfohlen.

Im Zuge der Lüftungsinstallation wurden die Räume des Spabereiches (bis dahin als Büro geplant) an das Kanalnetz des Lüftungsgerätes „Sauna“ angeschlossen. Allerdings weicht die Solltemperatur des Saunabereichs von der des separaten Spabereichs ab. In der Praxis zeigt dieses Beispiel, wie wichtig es ist, eine geschickte Zonierung und Aufteilung der Räume auf verschiedene Lüftungsgeräte vorzunehmen, um einerseits die gewünschte Raumtemperatur zu erhalten und andererseits den Volumenstrom und die Betriebszeiten bedarfsgerecht regeln zu können. Das Lüftungsgerät wird intermittierend betrieben, d.h. es wird nachts ausgeschaltet.

Sommerbypass

In der Auswertung bestätigt sich das Simulierte: Die Energie aus den Saunakabinen kann leider nur zu einem Teil über den Wärmetauscher an die Zuluft abgegeben werden, da sonst die Zuluft für den Saunavorbereich zu warm werden würde. D.h. eine eigene Wärmerückgewinnung für die Saunakabinen könnte die Lüftungsverluste reduzieren.

In diesem Projekt wird die Temperatur durch den Sommerbypass geregelt. Um die Lüftungsverluste zu reduzieren, konnte der Bypassbetrieb (Umgehung der Wärmerückgewinnung) im Winter 2015 gegenüber dem Winter 2014 erheblich reduziert werden (siehe Abbildung 87). Dies wurde durch einen größeren Abstand zwischen Solltemperatur und maximaler Temperatur in der Zone erreicht. Die starken Schwankungen des Volumenstroms in Abbildung 87 ergeben sich durch die Nachtabstaltung. Tagsüber verläuft der Volumenstrom weitgehend konstant.

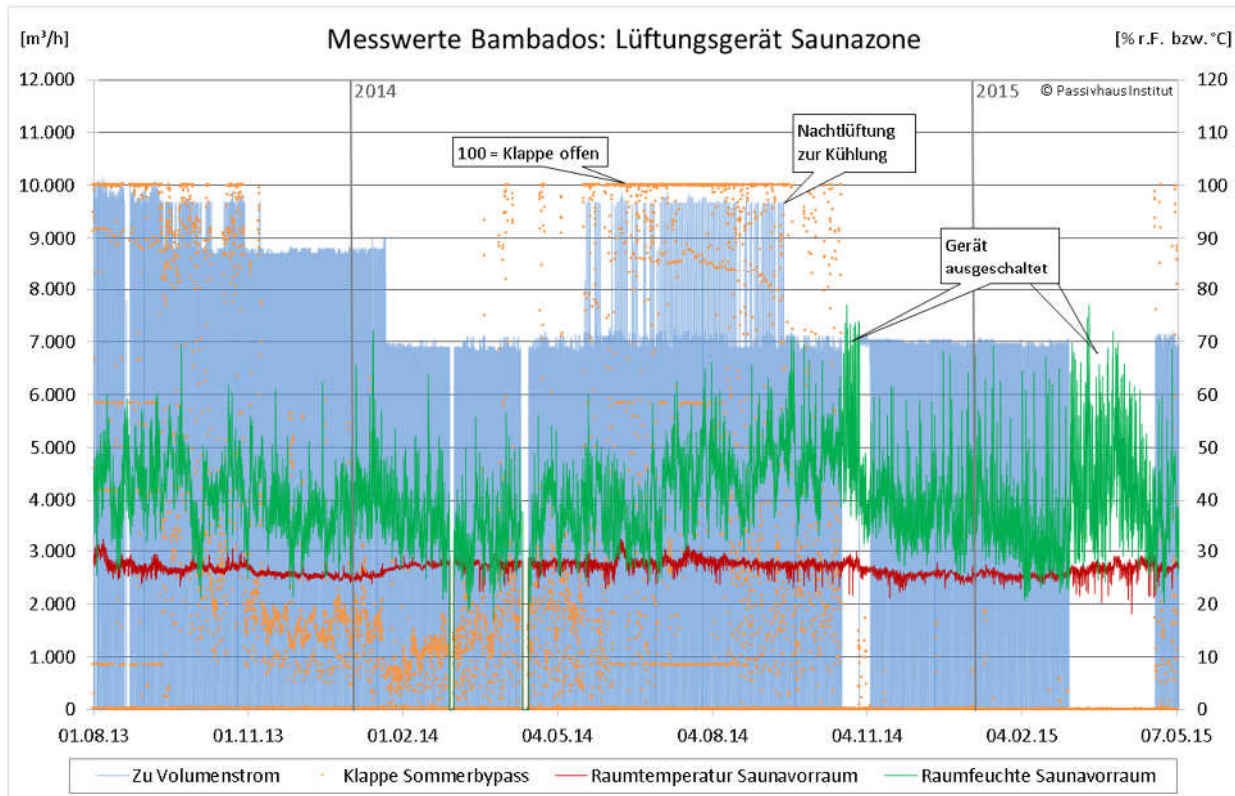


Abbildung 87: Lüftungsgerät Sauna: Der Einsatz des Sommerbypasses konnte im Winter 2015 wesentlich reduziert werden.

Stromverbrauch

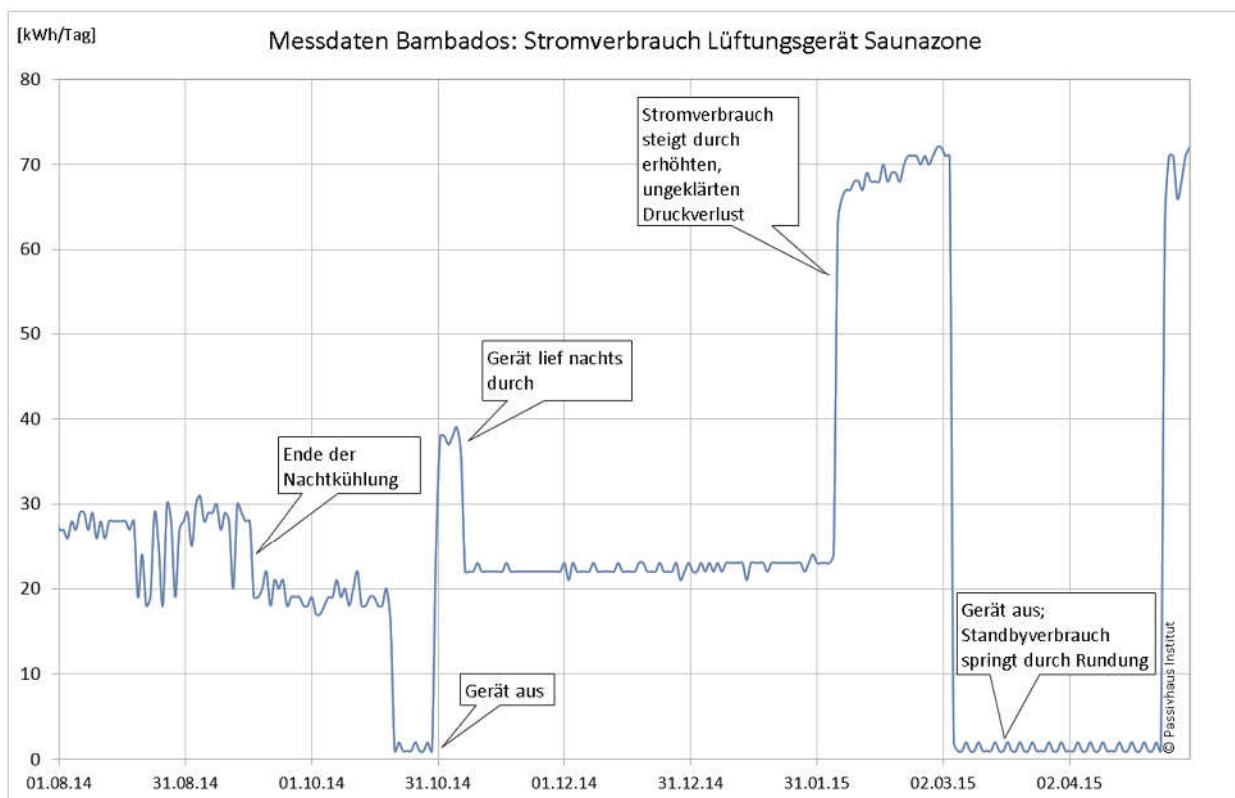


Abbildung 88: Lüftungsgerät Sauna: Stromverbrauch bei verschiedenen Betriebsweisen

Abbildung 88 zeigt deutlich die Auswirkung verschiedener Betriebsweisen (beabsichtigt oder aufgrund von Fehlern) auf den Stromverbrauch. Eine Volumenstromveränderung bewirkt zusätzlich zur Reduzierung des Strombedarfs eine Reduzierung des Heizwärmebedarfs durch geringere Lüftungsverluste. Das Gerät war zeitweise ausgeschaltet, erstaunlicherweise ohne dass dies vom Betreiber und den Gästen wahrgenommen wurde. Diese Tatsache zeigt, dass der Entfeuchtungsbedarf sehr gering ist und führt zu weiteren Überlegungen. Natürlich sollten für eine gute Luftqualität und die Sicherstellung der Entfeuchtung, die Vorräume und Ruheräume der Sauna belüftet werden. In den Saunakabinen würde vielleicht ein geringerer Luftwechsel ausreichen.

Empfehlungen Lüftung Saunabereich

- ggf. Saunakabinen mit separatem Lüftungsgerät
- oder geringerer Luftwechsel (weiterer Forschungsbedarf)

5.9 Warmwasserbereitung

Aus der Energiezentrale mit BHKW und Spitzenlastkesseln wird die Wärme an das Bambados übergeben und dort mit einem Heizkreislauf im Gebäude verteilt und an die einzelnen Wärmetauscher/Heizregister für Beckenwasser, Trinkwarmwasser und die Lüftungsgeräte verteilt. Warmes Wasser wird hauptsächlich für die Duschen, aber auch in kleineren Mengen für die Küche und zum Putzen verwendet. Dafür gibt es drei Systeme zur Warmwasserbereitung (Wärmetauscher mit Speichern):

- für die Duschen im Sportbereich mit 500 Liter Speicher
- für die Duschen im Saunabereich und die Küche mit 500 Liter Speicher
- für die Duschen im Freizeitbereich mit zwei 500 Liter Speichern. Da zu Spitzenzeiten das Speichervolumen zu klein war, wurde ein 1.000 Liter Speicher nachgerüstet. Damit können die Spitzenzeiten wesentlich besser abgedeckt werden.



Abbildung 89: Drei wärmegeämmte Warmwasserspeicher im Technikkeller des Bambados

5.10 Badewassertechnik

Im Bambados werden verschiedene Becken zur Verfügung gestellt (siehe nachfolgende Tabelle). Hauptaufgabe der Badewassertechnik ist die Hygiene des Beckenwassers sicherzustellen. Zusätzlich ist noch Technik für verschieden Attraktionen wie Rutschen, Sprudelliegen, Strömungskanal usw. installiert.

Tabelle 12: Becken mit Wasserflächen, -volumen und -temperaturen im Bambados

Becken	Beckenfläche [m ²]	Beckenvolumen [m ³]	Beckentemperatur (gemessener Mittelwert) [°C]
Freizeitbecken	354	436	32
Eltern-Kind-Becken	55	14	32
Lehrschwimmbecken 1	133	153	32
Lehrschwimmbecken 2 (mit Hubboden)	133	239	32
Sportbecken (teilweise mit Hubboden)	1.050	3.208	28
Rutschenbecken	16	k.A.	32
Gesamt	1.743	4.290	

5.10.1 Ultrafiltration

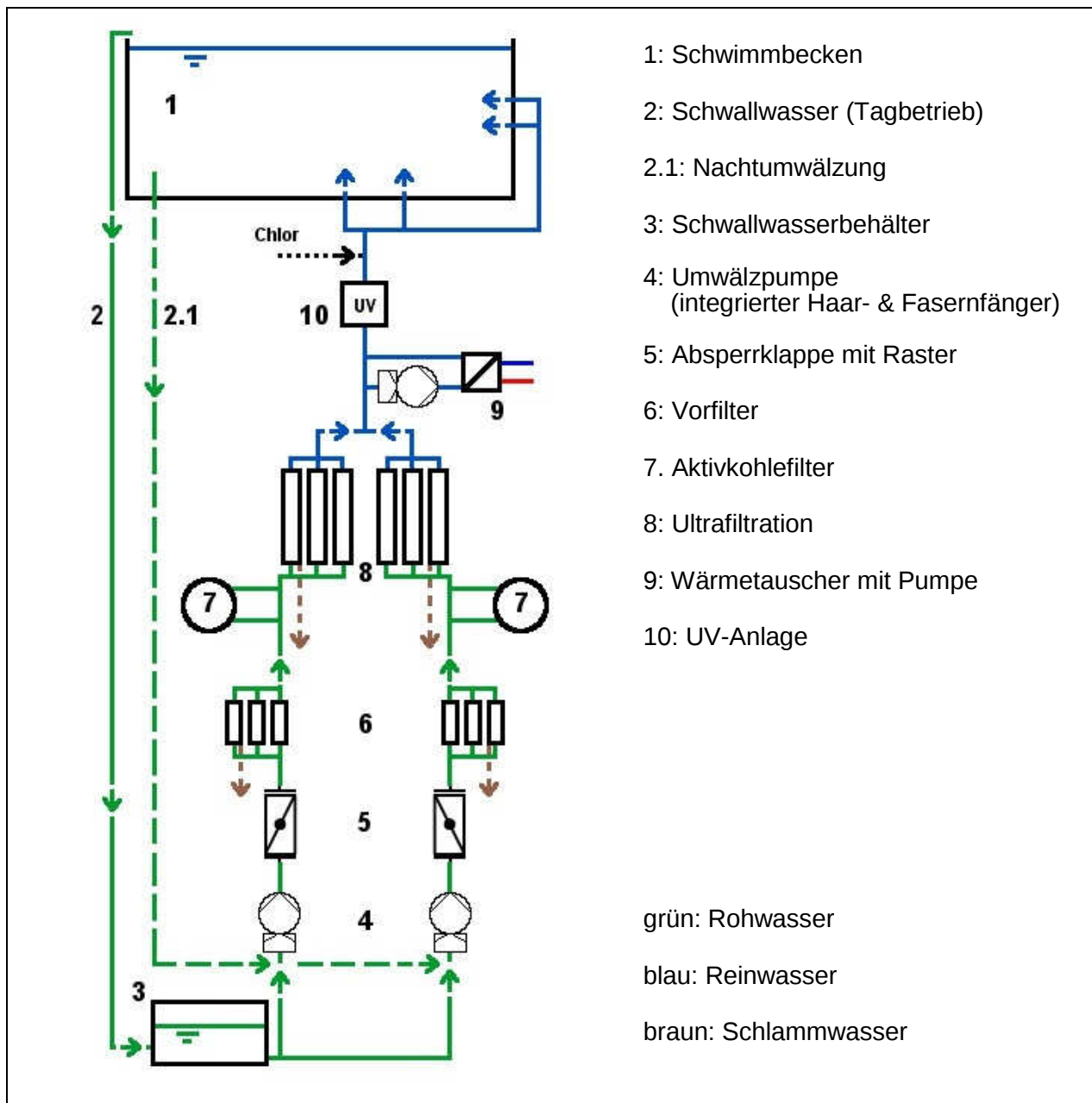


Abbildung 90: Schema der Badewasseraufbereitung im Bambados

Bei der Wahl der Filtration fiel die Entscheidung des Betreibers auf die zur Planungszeit noch junge Methode der Ultrafiltration (UF). In Abbildung 90 ist die genaue Abfolge der Wasseraufbereitung abgebildet. Da es anfangs Probleme mit den Werten des gebundenen Chlors gab, wurden Mitte 2012 Aktivkohlefilter nachgerüstet. Seitdem läuft das System problemlos, auch bei hohen Besucherzahlen lässt sich im Bambados mit dieser Verfahrenskombination mit dem geplanten Umwälzvolumenstrom (k -Faktor = 1) eine sehr gute Wasserqualität sicherstellen. Die Ultrafiltration hat gegenüber Mehrschichtfiltern den Vorteil, dass mit der Hälfte des Umwälzvolumens geplant wird. In der Praxis hat sich gezeigt, dass andere Bäder den geplanten Volumenstrom erhöhen mussten, um die Wasserqualität sicherzustellen. Im Bambados jedoch bestätigte sich der niedrige Planungswert.

Der Bauherr ist mit der Anlage zufrieden und es gab bisher noch keine Ausfälle der UF-Module. In Zukunft soll dennoch einmal im Jahr eine chemische Filterrückspülung durchgeführt werden, damit die Röhrchen der UF nicht dauerhaft verstopfen. Dies kann kostengünstig durch eine Firma mit mobiler Anlage durchgeführt werden. Das Installieren einer badeigenen Anlage würde sich nicht rechnen.

Als Nachteil der Ultrafiltration gilt der hohe Druckverlust der Filtermodule. Um diesen näher zu betrachten, wurde vom Ingenieurbüro inco GmbH eine Untersuchung der Beckenkreisläufe durchgeführt. Ziel war es, den Istzustand der Druckverluste insgesamt, und der Ultrafiltration im Besonderen, zu messen und damit weiteres Optimierungspotential aufzuzeigen.

5.10.2 Druckmessung

Am 20.10.2014 führte das Ingenieurbüro inco GmbH eine Messung des Druckverlaufs der Beckenkreisläufe (Sport 1 + 2, Freizeit 1 + 2) [Kaluza 20014]. Bei dem speziellen Messverfahren, das vom Büro selbst entwickelt wurde, wird mit Hilfe eines Manometers und kleinen Löchern in den Rohrleitungen abschnittsweise der Druck gemessen. Die Umwälzkreisläufe sind jeweils in zwei parallele Kreise mit eigenen Pumpen und Filtern aufgeteilt. Abbildung 91 zeigt die Messwerte des Drucks beider Kreisläufe des Sportbeckens.

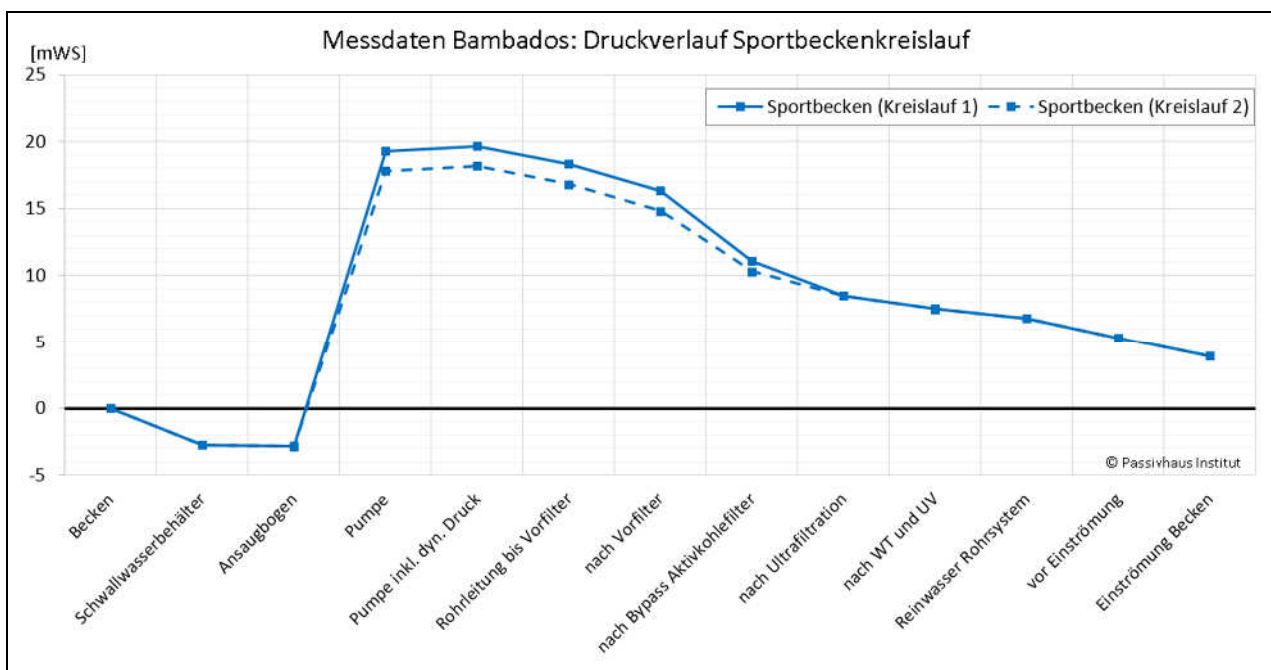


Abbildung 91: Sportbeckenkreislauf 1 + 2: Abschnittsweise Messung des Druckverlaufs, dargestellt in der Einheit mWS (Meter Wassersäule)

Im Vergleich zu den Angaben aus der Planungsphase ist der Druckverlust der Ultrafiltration geringer, dagegen ist der gesamte Druckverlust wesentlich höher. Im Sportbeckenkreislauf war der gesamte Druckverlust (Förderhöhe der Pumpe) von der Schwimmbadtechnikplanung mit 14 mWS (Meter Wassersäule) angegeben, die Messung ergibt einen Wert von 22 mWS. Die Ultrafiltration liegt mit einem Druckverlust von 2,6 bzw. 1,8 mWS für die zwei gemessenen Beckenkreisläufe, wie zu erwarten, höher als bei Sandfiltern, bildet aber nur einen Prozentsatz des gesamten

Druckverlustes. Zu beachten ist, dass der Druckverlust der Filter vom jeweiligen Verschmutzungsgrad abhängt.

Für die Rohrnetze der Umwälzkreisläufe im Bambados sind folgende hydraulische Optimierungen möglich und zu empfehlen (siehe auch Abbildung 92):

- Größere Rohrdurchmesser (Planungsziel der Geschwindigkeit: $v = 1\text{--}1,3\text{ m/s}$) haben großen Einfluss auf den Druckverlust (Druckveränderung mit $(1/D)^4$)
- Im Bambados sind die nachgerüsteten Aktivkohlefilter im Bypass so installiert, dass die Hauptstränge jeweils eingedrosselt werden. Alternativ könnten beide Aktivkohlefilter in nur einem Kreislauf parallel betrieben werden.
- Einen Kreislauf dauerhaft wie die interne Nachtumwälzung betreiben, damit wird der Höhenunterschied zwischen Becken und Schwallwasserbehälter gespart und zugleich wird ein Austrag auch der Partikel unterhalb der Wasseroberfläche erreicht.
- Möglichst geringe Höhendifferenz zwischen Becken und Schwallwasserbehälter (Lage und Füllstand des Schwallwasserbehälters)

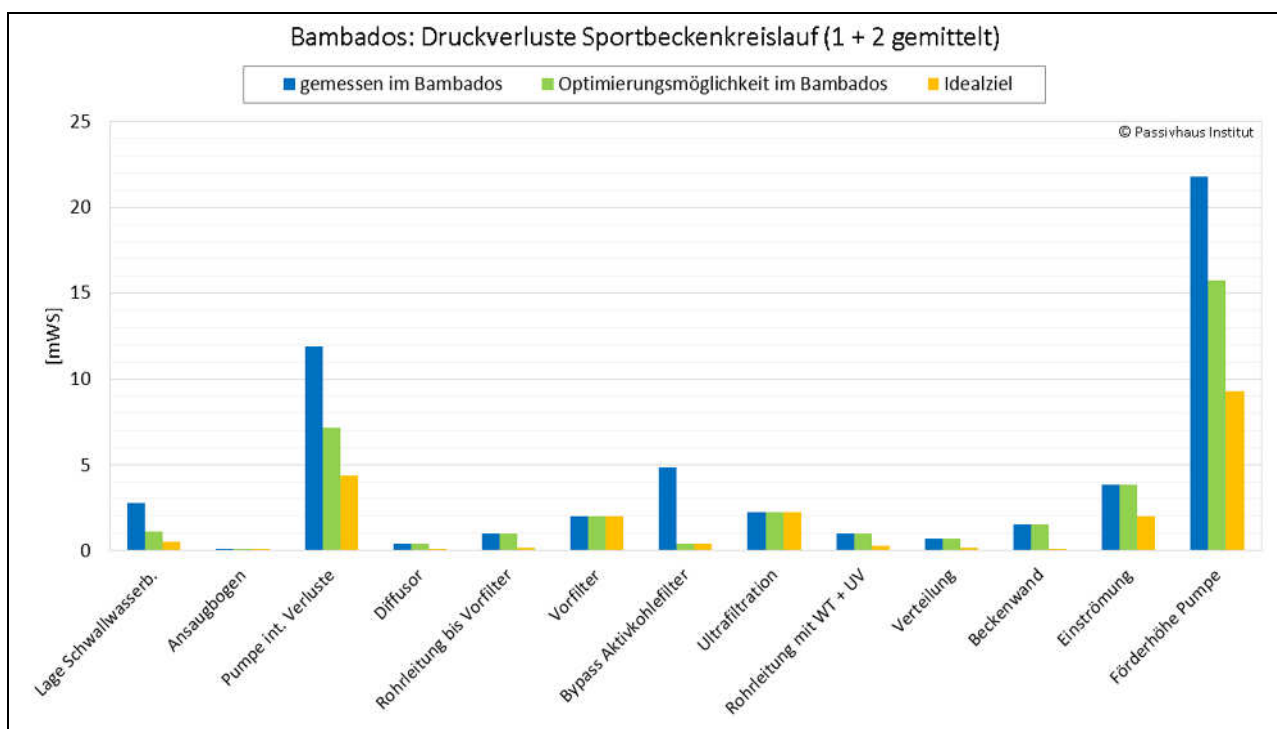


Abbildung 92: Sportbeckenkreislauf 1 + 2: Gemittelte gemessene Druckverluste der beiden Kreisläufe sowie deren Optimierungspotential im Bambados und Druckverluste in einem fiktiven „Idealbad“ [Kaluza 2014]

5.10.3 Pumpen und Stromverbrauch

Der Strombedarf wird einerseits durch die Druckverluste der Kreisläufe und andererseits durch die Eigenschaften der Pumpen bestimmt. Während der Beratung wurde großer Wert darauf gelegt, die Pumpen passend für den Betriebspunkt der Umwälzung auszulegen. Da die Pumpen zeitweise einen weiteren Betriebspunkt, nämlich für die Filterrückspülung, fahren müssen, kann es vorkommen, dass

der Betriebspunkt der Umwälzung in einen schlechteren Wirkungsgradbereich verschoben wird. Aus diesem Grund wurde im Bambados in den Kreisläufen der Rutschen und der Lehrschwimmbecken eine Druckerhöhungspumpe eingesetzt, die nur für die Filtrerrückspülung angeschaltet wird. Im Umwälzbetrieb konnte dadurch ein besserer Wirkungsgrad erzielt werden. Die Umwälzpumpen sind so gewählt, dass auch bei den größeren Förderhöhen ein guter Wirkungsgrad erreicht wird. In Abbildung 93 (rechts) ist die Pumpenkennlinie einer Sportbeckenumwälzpumpe für den Auslegungspunkt der Planung dargestellt.

Wird die Pumpe mit der tatsächlichen Förderhöhe ausgelegt, sinkt der Wirkungsgrad der Pumpe nur leicht von 79,9 % auf 78,1 %. Die Berechnung ergibt eine Leistung von ca. 10 kW und einen Gesamtwirkungsgrad (Pumpe, Motor und Frequenzumformer) von 71,9 %. Diese Leistung konnte durch eine temporäre Messung über zwölf Tage bestätigt werden.

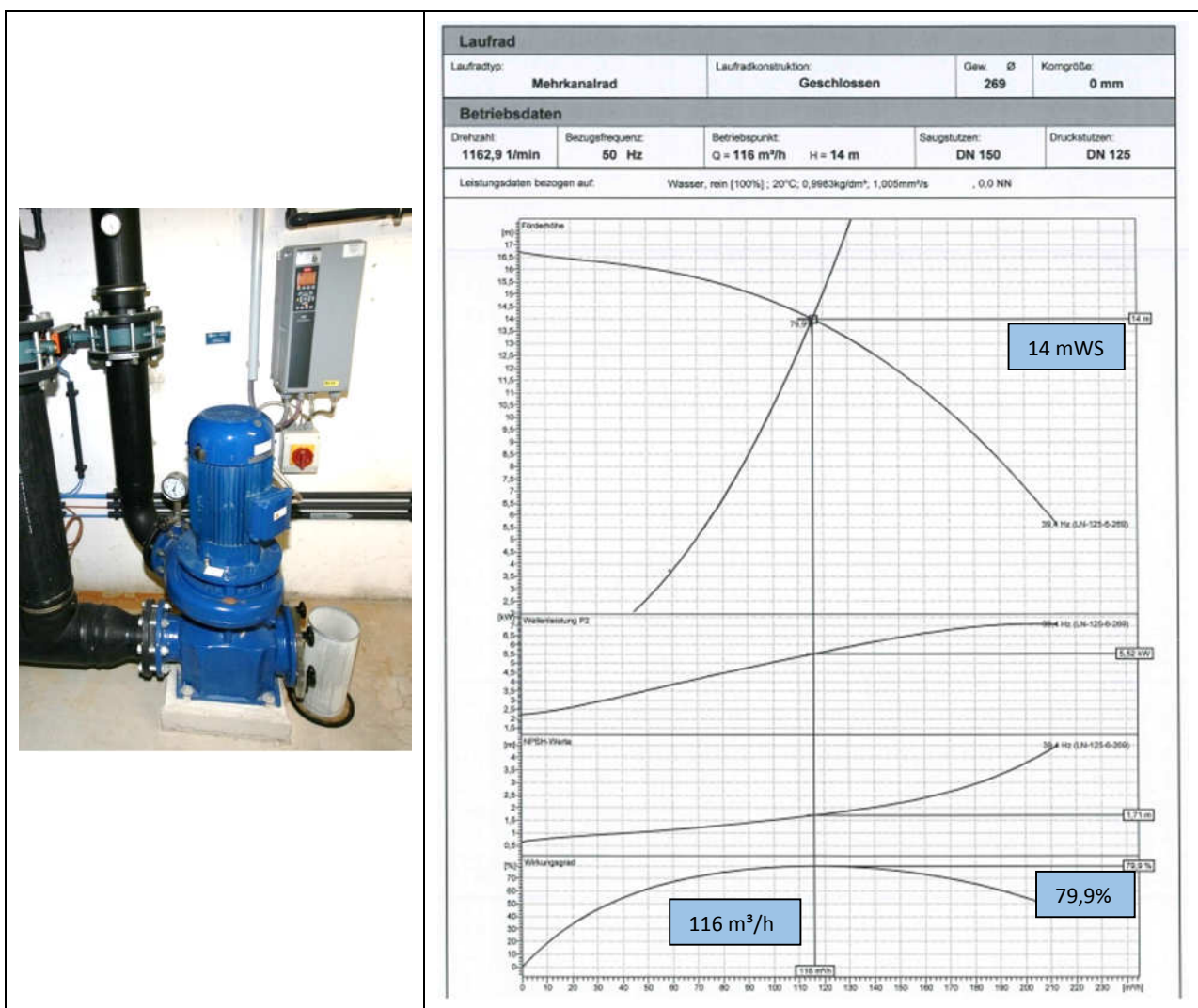


Abbildung 93: Sportbecken: Umwälzpumpe Unibad 125-270/1504X-W2 mit Frequenzumformer (oben rechts an der Wand) und Ersatz-Filterkorb (rechts unten); Pumpenkennlinie: 116 m³/h, 14 mWS, 79,9 % Pumpenwirkungsgrad (Auslegung: Fa. Herborner)

Der Strombedarf der Badewassertechnik setzt sich zusammen aus der hygienisch notwendigen Wasseraufbereitung, die Tag und Nacht läuft, und der Technik, die für Attraktionen z.B. Rutschen, Sprudelliegen usw. benötigt wird. Auf Grundlage zweier temporärer Messungen lässt sich eine grobe

Abschätzung dieser Anteile vornehmen. Im Tagbetrieb nehmen die Attraktionen ca. 30 % des Stromverbrauchs der Badewassertechnik ein, über 24 Stunden betrachtet sind es ca. 20 %.

Die Pumpen zur Beckenwasserumwälzung bilden den größten Teil des Stromverbrauchs der hygienischen Badewasseraufbereitung. Die Leistung aus der temporären Messung ergibt einen Wert von 0,084 kW pro tatsächlich gefördertem Kubikmeter Wasservolumen für den Sportbeckenkreislauf 1. Allerdings muss diese Anlage einen etwas höheren Druckverlust aufgrund der Ultrafiltration überwinden, gleichzeitig aber nur den halben Volumenstrom im Vergleich zu Mehrschichtfiltern befördern. Um Bäder trotz unterschiedlicher Filtrationsverfahren miteinander vergleichen zu können, bietet es sich an, den Stromverbrauch auf eine einheitliche Bezugsgröße zu beziehen. Dafür eignet sich der berechnete Umwälzvolumenstrom bei einem $k = 0,5 \text{ m}^{-3}$ (entspricht der Nennbelastung nach [DIN 19643]; k: Belastbarkeitsfaktor). Für ein Becken gleicher Größe und Nutzung ist dieser Wert immer gleich hoch und unabhängig vom Filtrationssystem oder dem gefahrenen Volumenstrom. Im Bambados ergibt sich für den Sportbeckenkreislauf 1 eine Referenzleistung von 0,042 kW pro m^3/h (herkömmliches Umwälzvolumen mit $k = 0,5 \text{ m}^{-3}$). Dies ist sozusagen das Ergebnis eines optimierungswürdigen Rohrnetzes, einer guten Pumpe und einem niedrigen Volumenstrom aufgrund der guten Filtrationsleistung der Ultrafiltration. Der Stromverbrauch ist vergleichbar mit den mittleren Werten aus dem Lippe Bad Lünen. Dort wurden bereits andere Optimierungsmöglichkeiten festgestellt. [Peper/Grove-Smith 2013]

Die hygienische Wasseraufbereitung ist Kernteil eines Schwimmbades und muss zu jeder Zeit sichergestellt werden. Deshalb werden die Umwälzkreisläufe auch nachts durchgängig in Betrieb gehalten. Im Nachtbetrieb wird eine Internumwälzung gefahren, d.h. der Wasserspiegel im Becken wird gesenkt, das Wasser ca. 50 cm tiefer aus dem Becken abgesaugt und direkt in die Vorfilter geleitet. Damit werden sowohl die Überlaufrinnen als auch der Schwallwasserbehälter umgangen. Der Druckverlust des Kreislaufes sinkt somit um 2,75 mWS. Weitere Stromeinsparungen könnten durch einen Teillastbetrieb erreicht werden. Allerdings ist der Volumenstrom aufgrund der Filtertechnik Ultrafiltration schon so gering, dass es schwierig ist, ihn noch weiter zu senken ohne die Beckendurchströmung einzuschränken.

Als Fazit zur Badewassertechnik lässt sich Folgendes bemerken:

- Der Betreiber ist mit der Filtrationsanlage (UF + Aktivkohle) und der Güte der Wasserqualität sehr zufrieden.
- Die interne Nachtumwälzung hat sich bewährt und wird auch aus reinigungstechnischer Sicht als positiv bewertet.
- Durch Optimierung der Druckverluste in den Rohrnetzen ließe sich der Stromverbrauchs weiter reduzieren (genaue Empfehlungen siehe oben).

6 Ergebnisse und Zusammenfassung

6.1 Gesamtergebnisse

Im Vordergrund steht die Frage: Wie stellt sich der Energieverbrauch des Bambados im Verhältnis zu anderen Bädern dar? Ein 1:1-Vergleich lässt sich leider mit Gesamtenergieverbräuchen nicht durchführen, da die Bäder sehr unterschiedliche Ausstattungen (Sauna, Spa, Attraktionen usw.) und Betriebsweisen (Öffnungszeiten, temporär beheizte Außenbecken usw.) aufweisen. Außerdem stehen keine statistisch belastbaren Verbrauchsdaten anderer Bäder zur Verfügung. Zur Orientierung wurden die Gesamtverbrauchswerte (Wärme, Strom, Wasser) des Bambados den entsprechenden Verbräuchen von ca. 37 Freizeitbädern (insgesamt 44 Jahresverbrauchsdaten) gegenüber gestellt (Mittelwert, Minimum und Maximum). Diese Daten stammen hauptsächlich aus [ÜÖBV] und zusätzlich Daten von 6 Bädern aus [SBFBauten 2012]. Für das Bambados wurde der Jahresmittelwert (Mai 2014 bis einschließlich April 2015) verwendet.

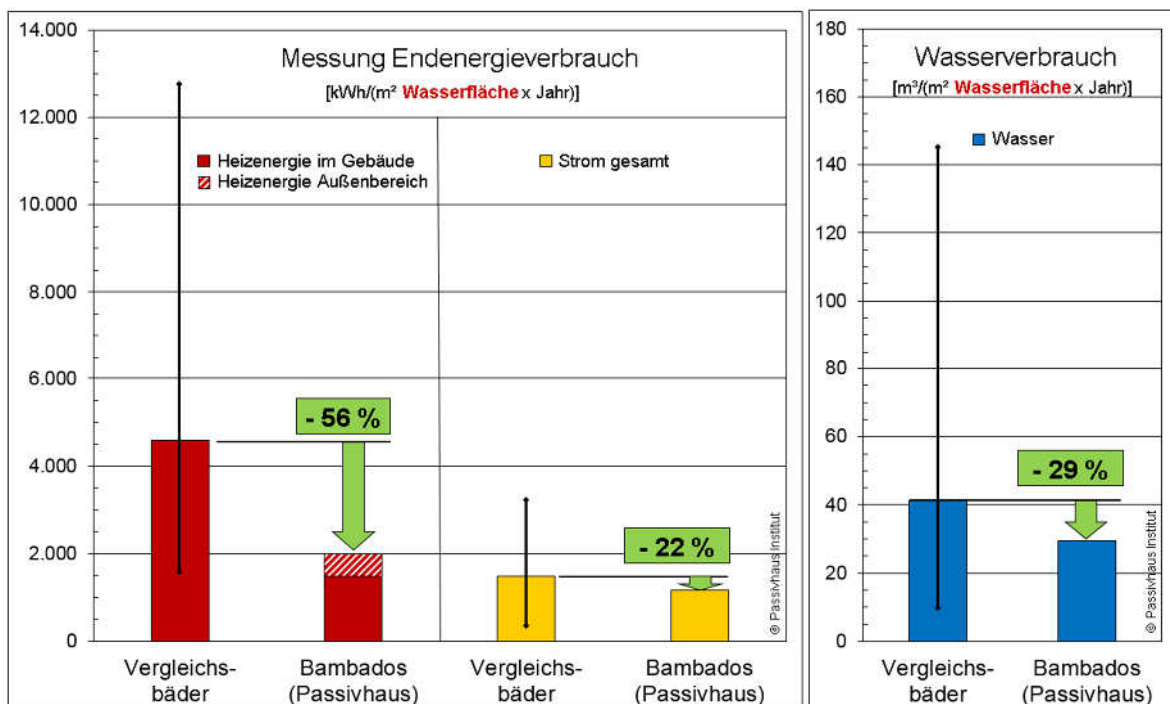


Abbildung 94: Vergleich des Endenergie- und Wasserverbrauchs (pro m² Wasserfläche) zu anderen Freizeitbädern. Zu beachten ist, dass die Verbrauchswerte nur bedingt miteinander verglichen werden können, da die Bäder über sehr unterschiedliche Ausstattungen (Sauna, Spa, Attraktionen usw.) und Betriebsweisen (Öffnungszeiten, temporär beheizte Außenbecken usw.) verfügen.

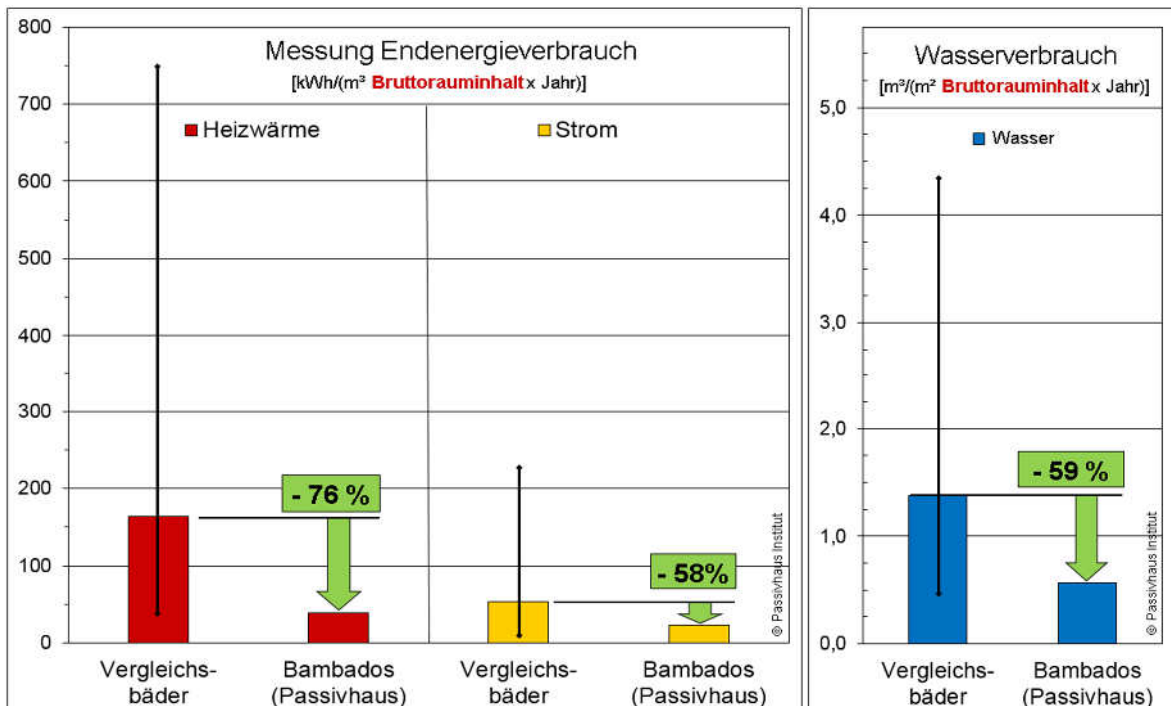


Abbildung 95: Vergleich des Endenergie- und Wasserverbrauchs (pro m³ Bruttorauminhalt) zu anderen Freizeitbädern. Zu beachten ist, dass die Verbrauchswerte nur bedingt miteinander verglichen werden können, da die Bäder über sehr unterschiedliche Ausstattungen (Sauna, Spa, Attraktionen usw.) und Betriebsweisen (Öffnungszeiten, temporär beheizte Außenbecken usw.) verfügen.

Abbildung 94 zeigt den Vergleich des Energieverbrauchs in Bezug auf die Wasserfläche und Abbildung 95 in Bezug auf den Bruttorauminhalt. Ergänzend ist jeweils auch der Wasserverbrauch dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Bezugsgröße einen entscheidenden Einfluss auf den Vergleich hat. Gerade für Freizeitbäder, die neben Wasserflächen noch andere Nutzungen wie Sauna, Gymnastikräume usw. anbieten, ist der übliche Bezug zur Wasserfläche nicht zielführend. Wenn man mehr als nur eine grobe Einordnung des Verbrauchs haben möchte, würde es sich empfehlen, einzelne Verbrauchsdaten mit unterschiedlichen Bezügen zu vergleichen. Zum Beispiel:

- Stromverbrauch Badewasseraufbereitung pro m³ Umwälzvolumen
- Stromverbrauch der Rutschen pro Rutsche, pro Meter Höhe
- Stromverbrauch der Beleuchtung pro m² Energiebezugsfläche
- Heizenergieverbrauch der Saunen pro Saunaplatz
- Heizenergieverbrauch Beckenwasser pro Beckenfläche oder Beckenvolumen

Selbst bei der Bewertung dieser genauen Vergleiche müssen Unschärfen wie z.B. unterschiedliche Beckentemperaturen und unterschiedliche Öffnungszeiten bedacht werden. Außerdem ist es bisher sehr schwierig, Daten in dieser Detailtiefe zu bekommen, da sie üblicherweise nicht erfasst werden.

Die Monitoringergebnisse zeigen deutlich, dass die Effizienzsteigerung im Bereich Heizenergie und Wasserverbrauch erfolgreich war, während im Bereich Strom zwar deutlich Energie eingespart wurde, in effizienten Techniken aber noch ein großes Potential vorhanden ist.

Bei der Beratung für das Pilotprojekt als Passivhaus-Hallenbad konnten unterschiedlich starke Optimierungen erreicht werden. Die Schwerpunkte der Beratung lagen bei der Gebäudehülle, der Verdunstung, den Schwimmbadpumpen und der Lüftung. Nur am Rande behandelt wurden der Außenbereich (dieser ist nicht Teil des Passivhaus-Konzepts und auf ihn entfallen ca. 25 % der gemessenen Heizenergie und ca. 6 % des gemessenen Stromverbrauchs), die Küche und die Nutzung durch den Pächter. Weiteres Optimierungspotential für weitere Projekte stecken im Bereich der Schwimmbadtechnik (konkrete Empfehlungen siehe Kapitel 5.10), der Zonierung und der Luftführung.

6.2 Zusammenfassung

Für den Neubau eines Freizeitbades in Bamberg setzte der Bauherr, die Stadtwerke Bamberg, im Jahr 2008 auf Energieeffizienz und entschied sich deswegen ein Passivhaus-Hallenbad zu realisieren. Dazu wurde das Passivhaus Institut Darmstadt, das im Vorfeld eine Grundlagenuntersuchung zu Passivhaus-Hallenbädern durchgeführt hatte [Schulz 2009], mit einer energetischen Beratung während des Planungsprozesses beauftragt. Zusätzlich konnte aufgrund der Förderung durch EnOB ein Monitoring durchgeführt werden. Bei Hallenbädern stehen aufgrund des hohen Energieverbrauchs die Betriebskosten im Fokus. Daher ist es naheliegend, sich die Möglichkeiten der Energieeffizienz zu Nutze zu machen und damit einen kostengünstigeren und langfristig planbaren Betrieb des Bades zu ermöglichen. Die Vorgehensweise des Passivhaus Institutes basiert auf einer Energieanalyse der gegebenen Nutzung (Schwimmen im warmen, sauberen Wasser etc.), um das Gebäude im Gesamten zu einer hohen Energieeffizienz zu führen. Als Pilotprojekt wurden dabei neue Wege gegangen und das Monitoring zeigt deutlich, dass das Gesamtkonzept und die ergriffenen Maßnahmen erfolgreich waren. Ergänzend wird erläutert, wie in Zukunft für das Bambados und für neue Hallenbäder noch weitere Reduzierungen des Energieverbrauchs möglich sind.

Das Bambados ist ein Freizeitbad mit Sport-, Freizeit-, Kinder-, Außen- und zwei Lehrschwimmbecken. Neben Attraktionen im Hallenbereich (Rutschen, Sprudelliegen, Schwallduschen usw.) bietet es einen Saunabereich im Inneren und Äußeren, einen Spabereich und Gastronomie.

Die Gebäudehülle (Wände, Dächer, Fundamente, Fenster, Anschlüsse etc.) wurde energetisch mit Hilfe einer Energiebilanz optimiert (durchschnittlicher U-Wert der gesamten Hülle: $0,164 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Zur Energiebilanzierung wurde ein speziell entwickeltes Mehrzonen-PHPP (Passivhaus Projektierungspaket) verwendet. Im Verhältnis zu einem Wohngebäude hat ein Hallenbad mit 32 °C Innentemperatur eine größere Temperaturdifferenz zur Außenluft und eine deutlich längere Heizperiode. Die im Passivhaus geforderte Luftdichtheit und deren Überprüfung sind für ein Hallenbad wegen der Raumluftfeuchtigkeit unersetzlich, um die Baukonstruktion zu schützen. Im Bambados konnte ein sehr guter n50-Wert von $0,07 \text{ h}^{-1}$ (entspricht $q_{50} = 0,21 \text{ m/h}$) erreicht werden.

Die **Passivhaus-Gebäudehülle** reduziert die Transmissionsverluste signifikant und bildet gleichzeitig für ein Hallenbad die Grundlage für weitere Energieeffizienzmaßnahmen:

- Möglichkeit von höheren Raumfeuchten und damit Reduktion der Verdunstungswärmeverluste und der Lüftungsverluste
- Lüftungsgeräte können ohne Umluftanteil betrieben werden; ein Anblasen der Fensterfassaden ist nicht notwendig

Die **Luftbedingungen in den Schwimmhallen** wurden auf Wunsch der Badegäste und aufgrund von energetischen Optimierungen der Lüftung im Verlauf des Betriebes angepasst. Betreiberseitig wurde durchgängig eine relative Feuchte von 58 % als Sollwert vorgegeben. Außerhalb der Öffnungszeiten wird der Sollwert für die relative Feuchte in Abhängigkeit von der Außenluftfeuchte erhöht, was energetisch vorteilhaft ist. Bei der orientierenden Messung der Schwimmhallenluft auf Trihalogenmethane war die Höhe der Konzentrationen unabhängig vom Umluftanteil. Die Messung zeigt allerdings, dass eine gute Luftdurchströmung essentiell ist.

Der **Heizwärmeverbrauch** im Bambados konnte um mehr als 50 % gegenüber Vergleichsbädern reduziert werden (siehe auch 6.1) Dieser setzt sich aus der Energie zusammen, die für die Beheizung der Raumluft (39 %), des Beckenwassers (41 %), des Warmwassers (16 %) und der Saunakabinen (5 %) benötigt wird.

Die Gründe für den geringen Heizwärmeverbrauch für die Lufterwärmung liegen in der Passivhaus-Gebäudehülle und bedarfsgerechten Lüftungsvolumenströmen. Es wird über die Zuluft geheizt. Heizkörper sind nicht notwendig. Dabei haben Zonen mit höherer Solltemperatur (Schwimmhalle, Umkleiden, Duschen) einen höheren Heizenergieverbrauch als kältere Zonen (Verwaltung, Lager, Technik). Um eine gute Regelung auch der kälteren Zonen (Verwaltung) zu ermöglichen, ist eine interne thermische Trennung sinnvoll.

Beim Heizwärmeverbrauch für die Becken ist auffallend, dass das „kältere“ Sportbecken (28 °C) im Vergleich zu den warmen Becken (32 °C) einen sehr geringen Heizwärmeverbrauch aufweist. Dies liegt vermutlich an den geringen Verlusten des Beckenwassers bzw. an den Gewinnen vom warmen Keller.

Neben der Beckenwassererwärmung muss Warmwasser hauptsächlich für die Duschen erwärmt werden. Hier ist der entscheidende Einflussfaktor für den Wasser- und Energiebedarf die Durchflussmenge der Duschköpfe. Der Energiebedarf zur Erwärmung eines Liter Wassers liegt bei ca. 60 – 70 Wh, die durchschnittliche Duschdauer etwa bei 3 Minuten pro Person.

Der **Stromverbrauch** konnte in Teilbereichen stark gesenkt werden, insbesondere im Bereich Lüftung. Der größte Anteil des Stromverbrauchs im Bambados wird durch die Badewassertechnik gebildet, gefolgt von Beleuchtung, Lüftung und sonstigen Verbrauchern wie Küche, Spa, Büro usw. Im Bereich der **Badewassertechnik** wurden im Betrieb Messungen der Druckverluste vor Ort durchgeführt, um weitere Einsparpotentiale aufdecken zu können. Die Umwälzpumpen wurden passend zu den Betriebspunkten ausgewählt. Die Messung der Druckverluste zeigt, dass die Ausführung der Rohrnetze Potential für eine Reduzierung des Stromverbrauchs bietet, indem u.a. durch geringe Strömungsgeschwindigkeiten ($v = 1\text{--}1,3\text{ m/s}$) die Druckverluste gesenkt werden. Mit Ergänzung eines Aktivkohlefilters reinigt die Ultrafiltration plus UV-Anlage das Wasser mit dem geplanten geringen Umwälzvolumenstrom (50 % im Verhältnis zu Mehrschichtfiltern) gut.

Für die **Beleuchtung** der Hallen kann das Tageslicht durch große Verglasungsflächen in der Fassade und shedartigen Lichtkuppeln im Dach genutzt werden. Die elektrische Beleuchtung ist mit T5-Leuchtstoffröhren und LED-Beleuchtung energieeffizient ausgeführt und wird in vielen Bereichen tageslichtgesteuert. Eine Optimierung der bedarfsgeregelten Steuerung (z.B. Putzbeleuchtung nachts) bietet Potential zu weiteren Einsparungen elektrischer Energie.

Der Bereich der Lüftung war sowohl Schwerpunkt der Beratung als auch der Betriebsoptimierung. Neben guten Wärmetauschern ist die Regelung von entscheidender Bedeutung. Im Hallenbereich wird der zur Entfeuchtung notwendige Außenluftvolumenstrom gefahren, mindestens jedoch 15 % nach [VDI 2089]. Nachts werden die Lüftungsgeräte ausgeschaltet, die Feuchte aber kontinuierlich überwacht. In den Nebenzonen konnten schon in der Planung die Volumenströme um insgesamt 50 % gesenkt werden, indem bedarfsgerechte Volumenströme und Überströmungen konzipiert wurden. Nach der Betriebsoptimierung konnte dieser reduzierte Wert durch Messdaten bestätigt werden. Beispiel: In den Umkleiden wird Zuluft eingebracht und über die Duschräume als Abluft abgeführt. Die erforderliche Entfeuchtungsleistung wird über eine Regelung nach relativer Feuchte sichergestellt. Die Auswertung ergab, dass der Entfeuchtungsbedarf so gering ist, dass er vom eingestellten Grundluftwechsel gedeckt wird. Ein bedarfsgerechter Volumenstrom im gesamten Gebäude ist deshalb so wichtig, weil sich eine Reduzierung des Volumenstroms gleich mehrfach auswirkt:

- Reduzierte Lüftungsverluste führen zu reduziertem Heizwärmeverbrauch.
- Reduktion des Stromverbrauchs für Lüftung
- niedrigerer Druckverlust im Kanalnetz und Lüftungsgerät; damit steigt die Stromeffizienz des Lüftungsgerätes und der Stromverbrauch sinkt zusätzlich
- Behaglichkeit: Zuglufterscheinungen werden vermieden und bei Räumen mit geringen Feuchtelasten (z.B. Büros) wird das Risiko von zu trockener Luft verringert.

Ein Beispiel dieser Auswirkungen sind in Abbildung 96 erkennbar: Der Stromverbrauch der Hallenlüftung wurde durch die Betriebsoptimierung um 60 % reduziert. Im gleichen Zeitraum konnte zudem der gesamte Stromverbrauch der Lüftung in den Nebenzonen um ca. 50 % reduziert werden.

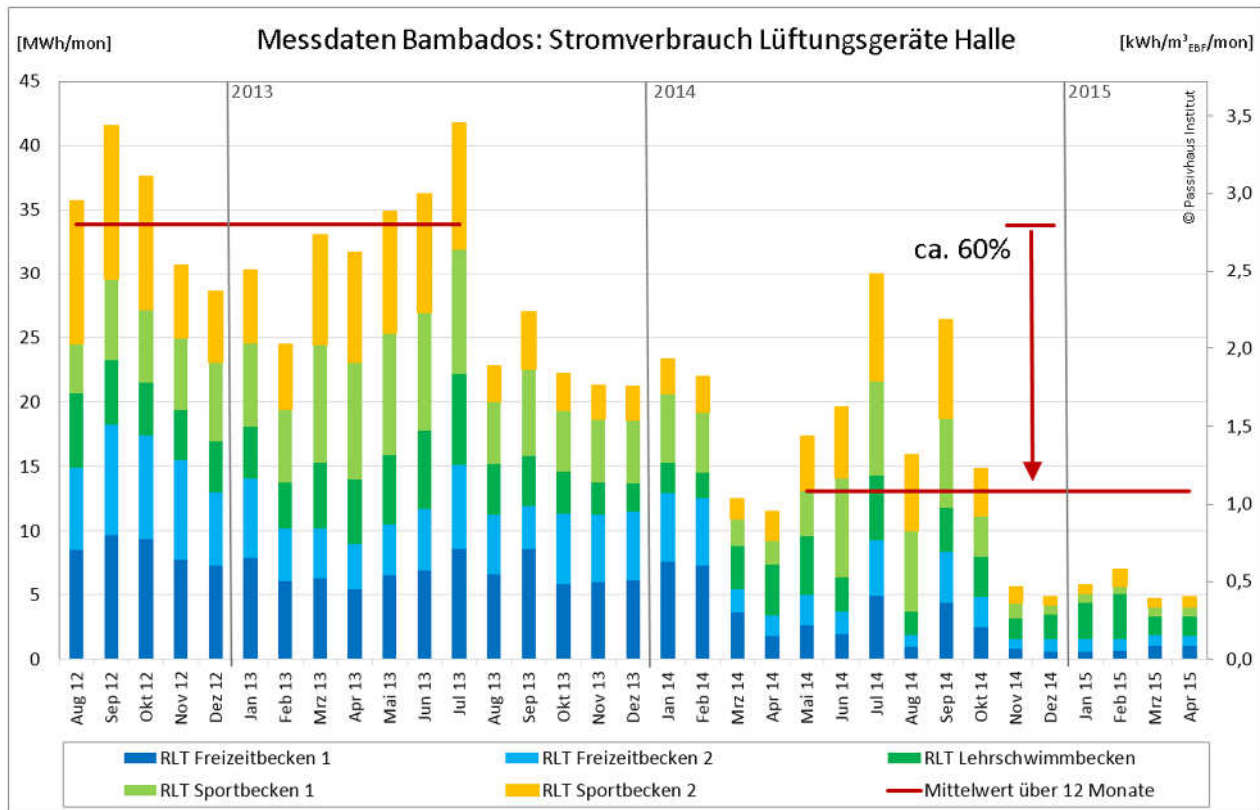


Abbildung 96: Reduzierung des Stromverbrauchs durch bedarfsgerechte Lüftungsregelung in den Schwimmhallen. (Dargestellt ist die Auswirkung der Einregulierung und Betriebsoptimierung, in Rot die durchschnittlichen Monatswerte gemittelt jeweils über ein Jahr)

Während des Monitorings hat sich gezeigt, dass eine **Einregulierung** bzw. **Betriebsoptimierung** in einem Hallenbad unerlässlich ist, unabhängig davon, ob Passivhaus-Standard oder eine andere Bauqualität vorliegt. Durch die digitale Datenerfassung mit Hilfe einer GLT ist es für den Betreiber möglich unmittelbar Rückmeldung zu erhalten. Damit diese Daten verfolgt, der Betrieb optimiert und langfristig kontrolliert werden kann, ist eine gute Information der Betreiber über die technischen Regelungen und energetischen Zusammenhänge essentiell.

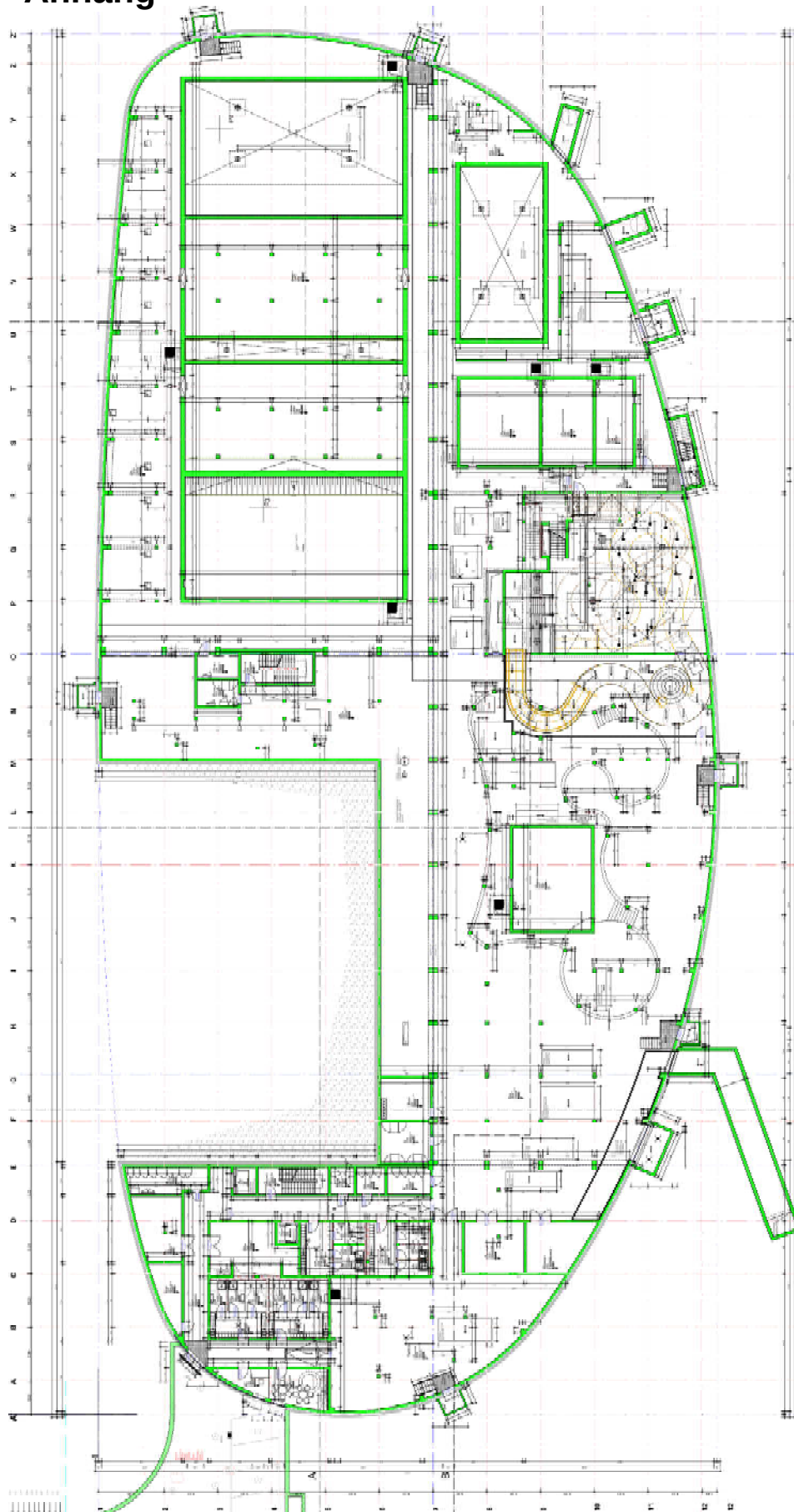
6.3 Weiterer Forschungsbedarf

Im Zuge dieser Auswertung wurde deutlich, dass es für künftige erfolgreiche Umsetzungen energieeffizienter Bäder hilfreich wäre, folgende Punkte noch eingehender zu untersuchen:

- Maßnahmen zur gesicherten Realisierung einer integralen Planung
- Maßnahmen zur gemeinsamen Einregulierung und Betriebsoptimierung (Zusammenarbeit von Planer, ausführende Firmen, Energieberatung und Betreiber)
- Luftführung in und Durchströmung von Schwimmhallen
- Prüfung der Möglichkeit eines Einsatzes von kleineren Lüftungsgeräten (Spitzenvolumenströme z.B. durch geeignete Regelung senken)
- Art und Optimierung des Druckausgleichs für Schwallwasserbehälter
- Untersuchung von Varianten zur Belüftung von Saunakabinen
- Untersuchung zum Einsatz verschiedener Wärmeerzeuger zur Beheizung
- Untersuchung von geeigneten Bezugsgrößen für den Vergleich verschiedener Bäder
- Referenz- und Zielwerte für Einzelbereiche

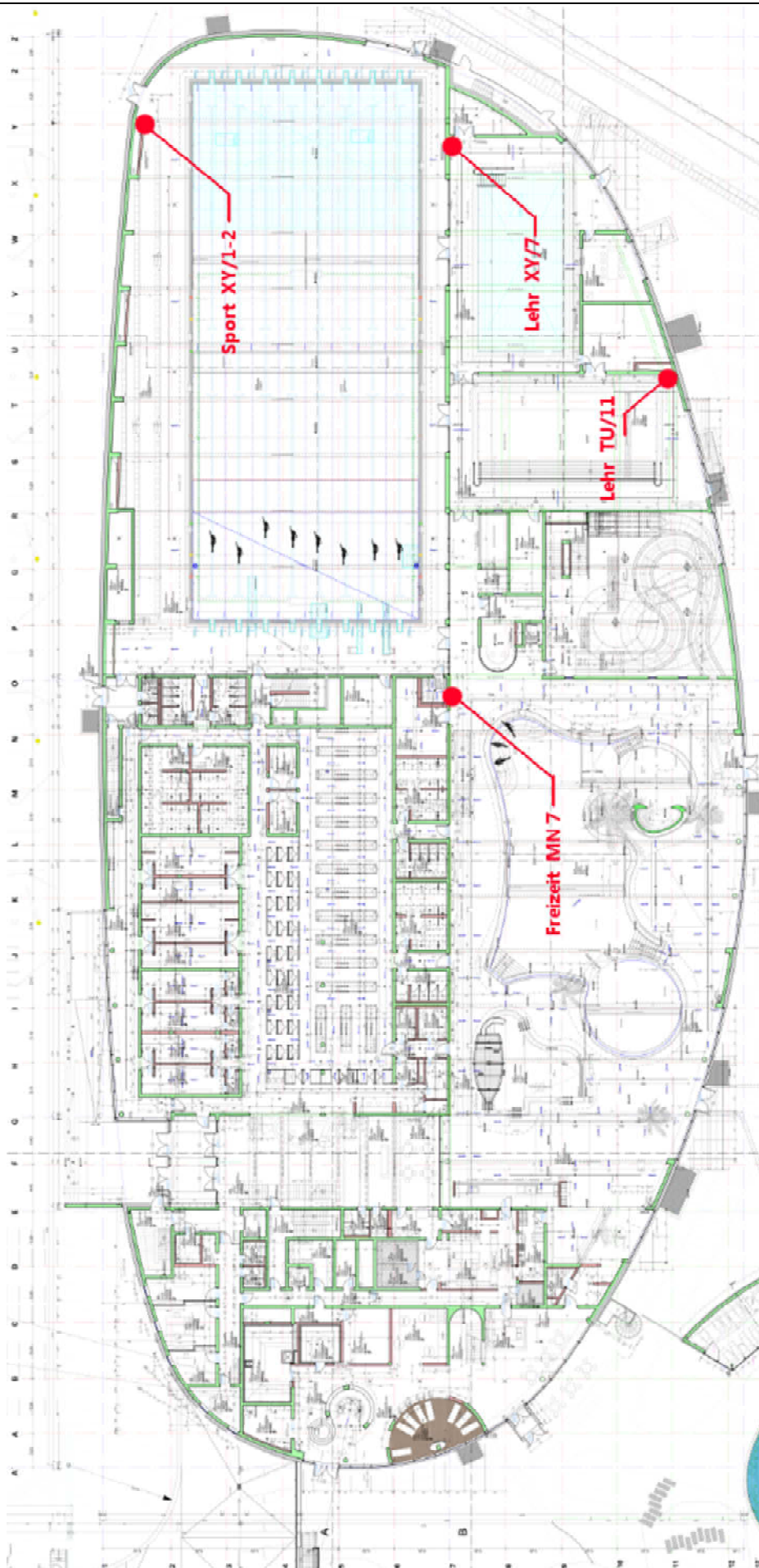
Die Stadtwerke Bamberg haben seit Inbetriebnahme des Bades viele nationale und internationale Gruppen durch das Bambados geführt. Dies zeigt, dass Energieeffizienz im Bäderbau auf reges Interesse stößt. Die in diesem Bericht dokumentierten Erkenntnisse sollen dazu beitragen, das hohe Potential an Energieeffizienz in zukünftigen Projekten und Badsanierungen umzusetzen.

7 Anhang



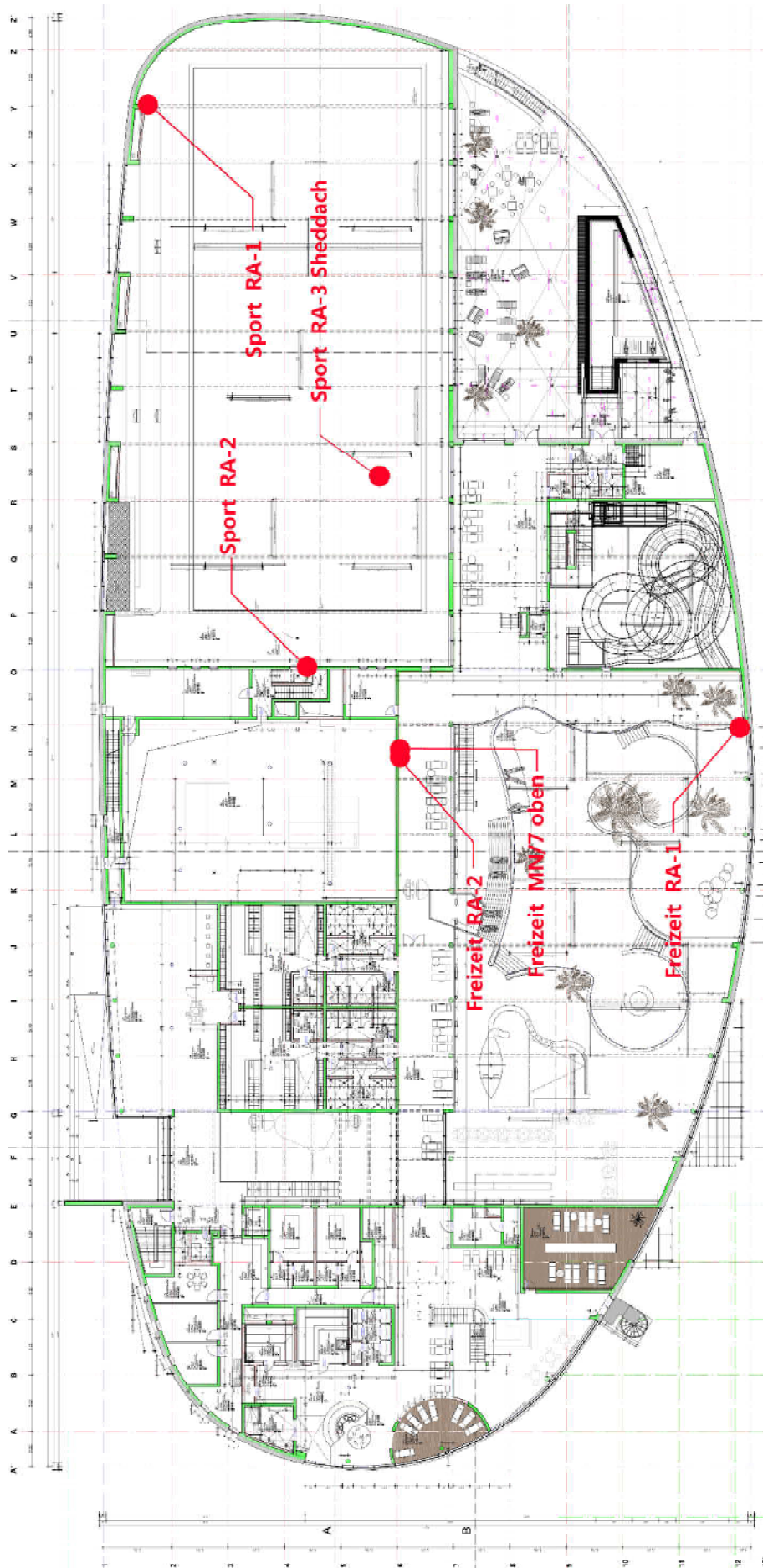
Grundriss UG

Quelle: pbr



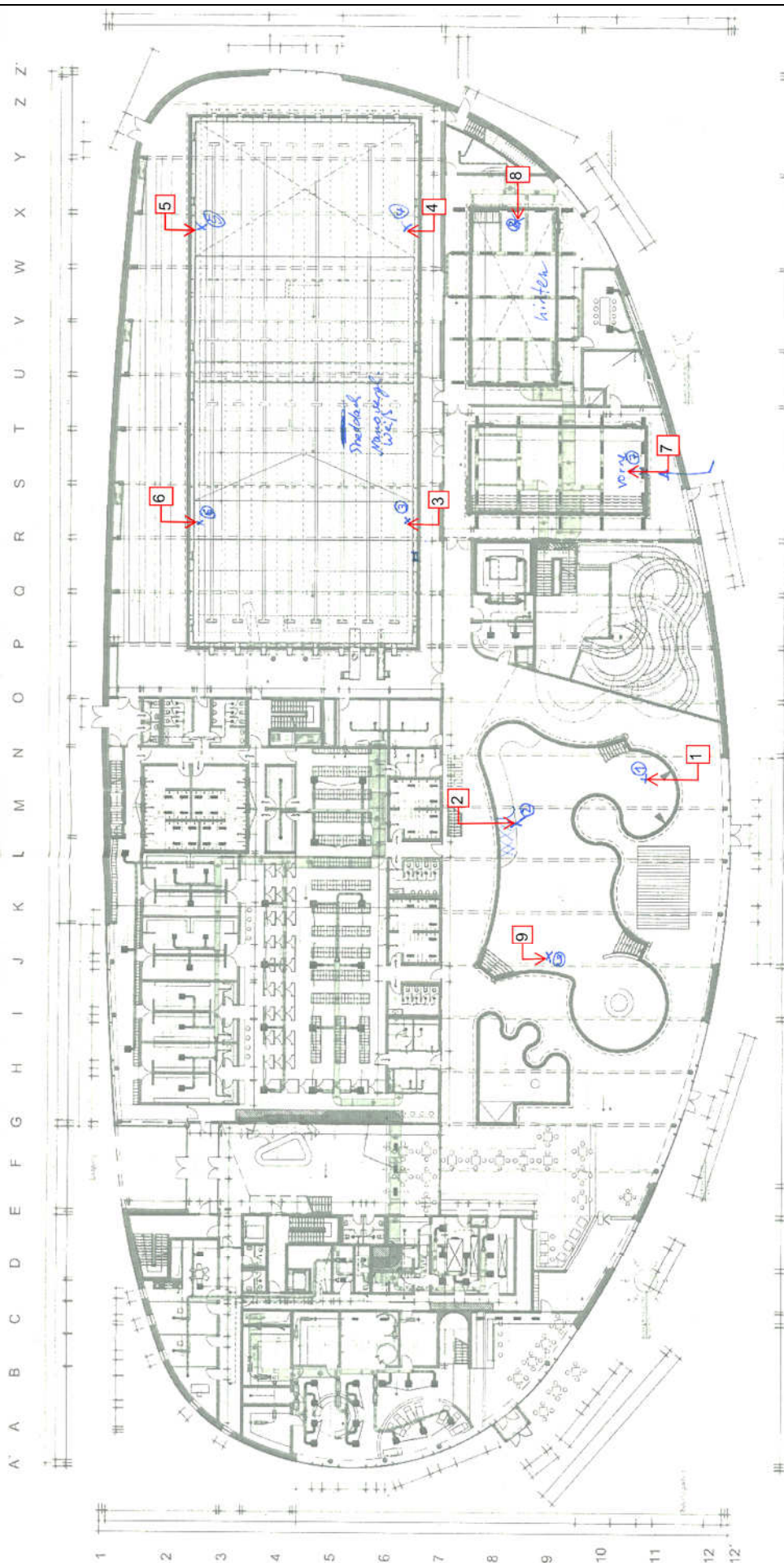
Grundriss EG mit Positionen der relevanten Sensoren für Lufttemperatur und Luftfeuchte

Quelle: pbr



Grundriss OG mit Positionen der relevanten Sensoren für Lufttemperatur und Luftfeuchte

Quelle: pbr



Grundriss EG mit Positionen der Trihalogenmethan-Messstellen

Quelle: pbr

8 Literaturverzeichnis

[BGL 2011]	Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades mit Konzepten der Passivhaustechnologie, Bädergesellschaft Lünen, Lünen 2011.
[CLG 2014]	Vogt, T.: Abschlussbericht 14/02/1402976s: Beurteilung der Analysenergebnisse zu den Prüfberichten 14/02/1402976 und 14/03/1406004, Projekt: Bambados Bamberg; Raumluft- und Beckenwasseruntersuchungen auf Trihalogenmethane Chemisches Labor Dr. Graser, Schonungen 2014.
[DIN 19643]	DIN 19643-1:Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser, Teil 1: Allgemeine Anforderungen, November 2012.
[GesAmtBW 2015]	http://www.gesundheitsamt-bw.de/oegd/Gesundheitsthemen/UmweltGesundheit/Chemische-Risiken/Desinfektionsnebenprodukte , abgerufen am 23.01.2015.
[Gollwitzer 2011]	Gollwitzer, E., Grove-Smith, J., 15. internationale Passivhaus Tagung in Innsbruck, AG Nichtwohngebäude im Passivhaus Standard; Planungsaspekte für öffentliche Hallenbäder, Darmstadt 2011.
[Gollwitzer 2014]	Gollwitzer, E., Schnieders, J., Fachzeitschrift „Gebäude Energie Berater“, Ausgabe 7/8 2014: „Passivhaus-Standard für Supermärkte und Hallenbäder, Versteckte Potenziale“.
[GSF 1997]	Koller, U.: http://www.gesundheitsamt.de/alle/umwelt/wasser/allg/beck_bw.htm , GSF-Forschungszentrum und Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, abgerufen am 23.01.2015.
[Huyeng 2015]	Huyeng, T.: Untersuchung der Temperatur- und Feuchteverteilung in der Luft des Passivhaus-Hallenbades „Bambados“ zur Beurteilung der Verdunstungsmengen des Beckenwassers, Darmstadt 2015.
[Kaluza 2014]	Kaluza, J.: Interner Bericht der Vorortmessungen am 20.10.2014, Ingenieurbüro inco GmbH, Aachen 2014.
[KOK 2002]	Koordinierungskreis Bäder: Richtlinien für den Bäderbau, Essen 2002.
[Krieger 2015]	Krieger, M.: Energetische Optimierung des Beckenwasserkreislaufs in einem Passivhaus-Schwimmbad, Darmstadt 2015.
[Peper/Grove-Smith 2013]	Peper, S; Grove-Smith, J.: Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe-Bad Lünen, Passivhaus Institut, Darmstadt 2013.
[SBFBauten 2012]	Fachzeitschrift „Sport Bäder Freizeitbauten Ausgabe“ 2/2012: „Energieverbrauch Vergleich Freizeitbäder Norddeutscher Raum“.
[Schulz 2009]	Schulz, Pfluger, Grove-Smith, Kah, Krick: Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad. Veröffentlicht: Passivhaus Institut, Darmstadt 2009.

[StadtwerkeBA 2015]	http://www.stadtwerke-bamberg.de/baeder/bambados/das-moderne-oekobad-mit-passivhausstandard.html , abgerufen am 03.08.2015.
[ÜÖBV]	ÜÖBV 2011, 2012, 2013: Überörtlicher Betriebsvergleich Bäderbetrieb (ÜÖBV 2011, 2012, 2013) der deutschen Gesellschaft für das Badewesen
[VDI 2089]	VDI-Richtlinien. VDI 2089-1 Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern, Hallenbäder. Hrsg. Von Verein Deutscher Ingenieure. Verein Deutscher Ingenieure, 2009.